

**Korkean tarkkuuden  
TDC-järjestelmän toteuttaminen  
FPGA:lla**

Pro Gradu -tutkielma, 12.5.2024

Tekijä:

EETU KUUSISTO

Ohjaajat:

JAAKKO JULIN

JAN SARÉN



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
FYSIIKAN LAITOS

© 2024 Eetu Kuusisto

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty.

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

# Tiivistelmä

Kuusisto, Eetu

Korkean tarkkuuden TDC-järjestelmän toteuttaminen FPGA:lla

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2024, 47 sivua

Tässä tutkielmassa tarkastellaan nopeiden signaalien havaitsemiseen soveltuvan TDC-järjestelmän suunnittelua, toteuttamista ja tutkimista. Toteutuksen pohjaksi valittiin Red Pitayan valmistama STEMLab 125-14 -laskenta- ja signaalinkäsittelykortti, jonka FPGA:lle varsinainen TDC muodostettiin. TDC:n toteutuksessa käytettiin haarautettua viivästyslinjastoa (TDL) alle kellojakson (350 MHz) aikaerojen mittaamiseksi.

Rakennetun TDC-järjestelmän suorituskykyä tutkittiin pääasiassa signaaligeneraattorin tuottaman signaalin avulla, mutta järjestelmän tutkimiseksi oikeissa mittauksissa toteutettiin myös myonien havaitsemiseen soveltuva ilmaisinallaiteisto. Työssä esitellään rakennettu prototyyppi-ilmaisim sekä sen toimintaperiaate. Lisäksi esitellään lyhyesti laitteistolla havaittavien kosmisten myonien ominaisuudet sekä syntymekanismit. Tutkielman painopiste on ilmaisimen signaalinkäsittelyssä ja TDC-järjestelmän suorituskyvyn tutkimisessa. Tämän lisäksi mittauksia suoritettiin myös gammasäteilyä havaitsevilla  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ -tuikeilmaisimilla. Saadut tulokset osoittavat toteutetun TDC-järjestelmän toimivan erittäin hyvin, etenkin signaaligeneraattorin avulla toteutetuissa mittauksissa. Järjestelmän aikaresoluutioksi saatiin tällöin tyypillisesti alle 45 ps.

Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat rakennetun TDC-järjestelmän suorituskyvyn arviointi nopeiden signaalien havaitsemisessa sekä sen toiminta ja soveltuvuus myoni-ilmaisinallaiteiston osana. Tutkielmaa varten tehtyä TDC-järjestelmää on tarkoitus käyttää jatkossa myös muiden ilmaisinallaiteistojen osana.

Avainsanat: aikaero, TDC, hiukkasilmaisim, myoni

## Abstract

Kuusisto, Eetu

Implementation of a high precision TDC system using FPGA

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2024, 47 pages.

This thesis examines the design, implementation, and investigation of a Time-to-Digital Converter (TDC) system suitable for detecting fast signals. As a basis for the implementation, the STEMLab 125-14 computation and signal processing card manufactured by Red Pitaya was selected, on which the actual TDC circuitry was formed on the FPGA. A tapped delay line, TDL, was used in TDC to achieve faster than reference clock (350 MHz) timings.

The performance of the constructed TDC system was primarily researched using signals generated by a signal generator. However, to examine the system in real measurements, a detector suitable for detecting muons was also constructed. The thesis presents the constructed prototype muon detector and its operating principle. Additionally, it briefly introduces the characteristics and formation mechanisms of cosmic muons detectable with the equipment. The focus of the thesis is on signal processing of the detector and the investigation of the TDC system's performance. Furthermore, measurements were also conducted using  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  scintillation detectors sensitive to gamma radiation. The obtained results show that the TDC works very well, especially in measurements made using the signal generator. The time resolution of the system was typically  $< 45$  ps.

The main research questions of the thesis are the evaluation of the performance of the constructed TDC system in detecting fast signals, as well as its operation and suitability as part of a muon detection system. The TDC system developed for the thesis is intended to be used in the future as part of other detector systems as well.

Keywords: Time-interval, TDC, particle detector, muon



## Esipuhe

Haluan kiittää ohjaajiani, Jaakko Julinia ja Jan Sarénia siitä, että sain mahdollisuuden työskennellä tämän innostavan ja antoisan opinnäytetyön parissa. Samalla haluan kiittää heitä kaikista keskusteluista, kommenteista ja kannustuksista, jotka olivat korvaamattoman arvokkaita tämän opinnäytetyön tekemisen aikana. Olen myös erittäin kiitollinen perheelleni ja ystäväilleni heidän tuestaan koko prosessin ajan.

Kokemäellä 12. huhtikuuta 2024

*Eetu Kuusisto*

# Sisälllys

<b>Tiivistelmä</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Teoreettinen tausta</b>	<b>9</b>
2.1 Aikaeron mittaaminen . . . . .	9
2.2 Kosmiset säteet . . . . .	12
2.3 Varattujen hiukkasten vuorovaikutukset . . . . .	16
2.4 Valon käyttäytyminen tuikemateriaalissa . . . . .	17
<b>3 TDC-järjestelmä</b>	<b>20</b>
3.1 FPGA . . . . .	21
3.2 Haaroitetun viivästyslinjan kalibrointi . . . . .	24
3.3 Aikaleimojen luominen ja käsittely . . . . .	24
<b>4 Kokeelliset menetelmät</b>	<b>27</b>
4.1 Signaaligeneraattoritutkimukset . . . . .	27
4.2 Gammailmaisimien mittaukset . . . . .	28
4.3 Myoni-ilmaisimien mittaukset . . . . .	30
4.3.1 SiPM-ilmaisimen toiminta . . . . .	31
<b>5 Havainnot</b>	<b>33</b>
5.1 TDC:n suorituskyky . . . . .	33
5.2 Gammailmaisimen mittaukset . . . . .	38
5.3 Myoni-ilmaisimen mittaukset . . . . .	39
<b>6 Johtopäätökset</b>	<b>42</b>
<b>Lähteet</b>	<b>44</b>

# 1 Johdanto

Tässä tutkielmassa perehdytään tarkkojen aikaerojen mittaamiseen rakennetulla TDC-järjestelmällä, sekä tämän järjestelmän suorituskyvyn tutkimiseen. Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat rakennetun TDC-järjestelmän suorituskyvyn arviointi nopeiden signaalien havaitsemisessa ja näiden aikaeron mittaamisessa, sekä TDC-järjestelmän soveltuvuus aikaisemmin rakennetun myoni-ilmaisinlaitteiston tarpeisiin. Projektin inspiraationa toimi Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksella ollut tarve uuteen TDC-järjestelmään sekä toisaalta aikaisemmin tutkimani myoni-ilmaisimen jatkokehitys.

Ajan mittaaminen on aina ollut keskeinen osa ihmiskunnan kehitystä. Ajan käsite on olennainen kaikessa, mitä teemme ja havaitsemme ympärillämme, ja sen tarkka mittaaminen on mahdollistanut monia merkittäviä saavutuksia erilaisilla elämänalueilla, muun muassa luonnontieteissä. Historiallisesti ajan mittaamisen kehitys voidaan jäljittää aina muinaisiin aurinko- ja vesikelloihin, joiden avulla ihmiset alun perin jakoivat ajan päivän mittaan. Antiikin kulttuureissa ajan mittaaminen oli tärkeää niin maanviljelyksessä, navigoinnissa kuin uskonnollisissa seremonioissakin. Kuitenkin moderni ajan mittaamisen tieteellinen perusta kehittyi vasta 1600- ja 1700-luvuilla, kun tarkat kellot ja mekanismit alkoivat yleistyä. Teollisen vallankumouksen myötä tarkka ajan mittaaminen sai uuden merkityksen, kun se mahdollisti tehtaiden ja rautateiden aikataulujen synkronoimisen.

Nykyisin ajan mittaaminen on keskeistä monilla tieteenaloilla. Fysiikan alalla erittäin tarkat aikamittaukset ovat olennaisia esimerkiksi kvanttiteknologian kehityksessä ja satelliittipohjaisessa navigoinnissa. Lääketieteessä tarkka ajan mittaaminen mahdollistaa esimerkiksi hermoimpulssien seurannan ja lääkkeiden annostelun oikea-aikaisuuden. Teknologian kehittyessä myös arjen laitteet, kuten älypuhelimet ja tietokoneet, hyödyntävät tarkkoja ajan mittaamenetelmiä monin eri tavoin.

Fysiikan perustutkimuksessa tarvitaan myös usein tarkkaa hiukkasen lentoajan määrittystä. Esimerkiksi tämän projektin suunnittelun lähtökohtana oli tarve kehittää uusi TDC-järjestelmä Jyväskylän yliopiston kiihdytinlaboratorion Pelletron-kiihdyttimellä tuotettujen hiukkasten lentoaikojen mittaamiseen. Samalla luotua järjestelmää voitiin hyödyntää ja testata aikaisemmin luodun kosmisten myonien havaitsemiseen tarkoitettun MOTTI-ilmaisimen [1] kanssa.

Kosmisen säteilyn aiheuttamien myonien tutkimukseen liittyvä historia juontaa juurensa 1930-luvulle, kun Seth Neddermeyer ja Carl Anderson tekivät ensimmäiset havainnot myoneista vuonna 1936. Anderson havaitsi sumukammion avulla hiukkasia, jotka kaartuivat magneettikentässä negatiivisen hiukkasen tavoin. Kuitenkin näillä havaituilla hiukkasilla vaikutti olevan huomattavasti elektroneja suurempi massa. Aluksi hiukkasen arveltiin olevan teoreettisesti ennustettu Yukawan hiukkanen, mutta nopeasti havaittiin, että löydetyllä uudella hiukkasella ei ollut vahvaa vuorovaikutusta. [2]

MOTTI-ilmaisimen tarkoituksena on toimia kannettavana kosmisten myonien havaintoasemana, joka on suunniteltu erityisesti koulukäyttöön [1]. Tämän avulla pyritään edistämään modernin fysiikan ymmärtämistä ja opettamista kouluissa. Kosmisten myonien tutkiminen tarjoaa opiskelijoille mahdollisuuden hahmottaa modernin fysiikan ilmiöitä kuten hiukkasten hajoaminen ja aikadilaatio. Samalla voidaan esittää hiukkasten, kuten myonien, vuorovaikuttamista aineen kanssa. Lisäksi kosmisilla myoneilla on joitakin käytännön sovelluskohteita, kuten suurten rakenteiden kuvantaminen ja rautasulatoissa tapahtuvien prosessien seuranta [3]. Yhdysvaltain asevoimien tutkimusorganisaatio DARPA (eng. Defense Advanced Research Projects Agency) on myös osoittanut kiinnostusta myonien käyttöön kuvantamisessa. DARPA aloitti suunnattavan ja liikuteltavan myonigeneraattorin luomiseen tähtäävän nelivuotisen projektin syksyllä 2022 [4]. Tulevaisuudessa voidaan odottaa löytyvän entistä enemmän uusia sovelluskohteita kosmisille myoneille, kun niiden havaitsemiseen käytettävä ilmaisintekniikka kehittyy ja muuttuu edullisemmaksi.

## 2 Teoreettinen tausta

Tässä kappaleessa esitellään työssä käytettyä teoriaa kosmisen säteilyn, ilmaisimen toiminnan sekä ajan mittaamisen kannalta. Kosmisen säteilyn osalta tässä työssä keskitytään havainnoituihin myoneihin ja niiden havaitsemiseen maanpinnalla. Ilmaisimen toiminnan kannalta keskeistä on käydä läpi varattujen hiukkasten vuorovaikutuksia materiaalin kanssa sekä tuikemateriaalin toimintaan. Ajan mittauksessa keskitytään käsittelemään nopeiden, nanosekuntin luokkaa olevien, signaalien havainnointiin liittyviä asioita. Työssä käytetyn ilmaisimen tekniikasta ja rakenteesta on kerrottu tarkemmin luvussa 3.

### 2.1 Aikaeron mittaaminen

Käsiteltäessä nopeita signaaleja on usein hyödyllisempää tarkastella kahden tapahtuman välistä aikaeroa pelkkien tapahtuma-aikojen sijaan. Aikaero saadaan yksinkertaisesti vähentämällä jälkimmäisen tapahtuman ajasta ensimmäisen tapahtuman aika. Tavallisesti aikaeroa mittaavat järjestelmät rakennetaan siten, että toinen signaaleista tulee aina ennen toista, jolloin voidaan puhua aloitus- ja lopetussignaaleista.

Yksinkertaisimmillaan aikaeroa voidaan mitata laskureilla, jotka kasvattavat arvoaan säännöllisesti niin kutsutun referenssikellon mukaan. Tapahtuman sattuessa laskurin arvo kirjataan muistiin. Tällöin tapahtuman aika ( $T$ ) saadaan yksinkertaisesti kertomalla laskurin lukemaa ( $n$ ) kellojakson kestolla ( $T_0$ ), eli  $T = n \cdot T_0$ . Tämä tarkoittaa samalla, että referenssikellon taajuus säätelee suoraan järjestelmän resoluutiota.

Aika-digitaalimuunnin eli yleisesti TDC (engl. time-to-digital converter) on erittäin tarkka järjestelmä, joka kertoo digitaalisessa, eli binäärisessä, muodossa ajan, jolloin tutkittu tapahtuma tapahtui. Yksinkertaisimmillaan TDC on edellä kuvatun mukainen laskuri, joka kasvattaa arvoaan joka kellojakso ja tapahtuman sattuessa kirjaa laskurin arvon muistiin. TDC-järjestelmiä käytetään yleisesti aikaerolaskurina (eng. time-interval meter, TIM) erilaisissa ilmaisimissa mittaamassa aikaa kahden tapahtuman välillä. Aikaerolaskurin toimintaperiaate on esitettyinä kuviossa 1. Eräs tärkeimmistä aikaerolaskurien käyttökohteista ovat lentoaikasovellukset (engl. time-of-flight, ToF). Näitä käytetään esimerkiksi lääketieteellisessä kuvantamisessa, ydinfysiikan tutkimuksissa sekä hiukkasten

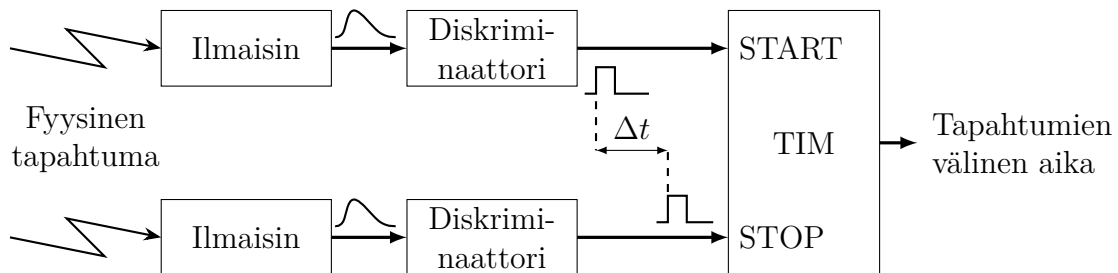
tunnistamisessa [5–7].

Tarkoissa mittauksissa halutaan kuitenkin usein mitata aikaeroja pelkkää kellosignaalin antamaa aikaa tarkemmin. Tällöin voidaan turvautua niin kutsuttuihin haarautettuihin viivästyslinjoihin (engl. tapped delay line, TDL). Haarautetussa viivästyslinjassa signaalista erkaannutetaan yhä uudelleen uusia haaroja kuvion 2 mukaisesti. Koska signaalin kulku ei ole äärettömän nopeaa, viivästyy se vähän ennen kutakin haaraa. Jokaisessa haarassa signaalia odottaa D-kiikku (engl. D flip-flop), johon signaalin saapuminen tallennetaan muistiin. Kellojakson lopuksi kiikkujen sisältämät ykköset summataan ja tästä summasta voidaan päätellä mihin asti viivästyslinjaa signaali ehti kellojakson aikana. Mikäli signaali on ehtinyt kiikulle asti ennen kellon vaihtumista, on kiikkuun tallennettu korkea logiikkasignaali eli 1, muulloin matala logiikkasignaali eli 0. Mitä pidemmälle linjassa mennään sitä enemmän aikaa on kulunut, eli laskemalla D-kiikkujen ykköset yhteen voidaan selvittää mihin asti viivästyslinjaa signaali ehti kellojakson aikana. Tässä yhteydessä laskurin arvoon perustuvasta ajasta käytetään yleensä nimitystä karkea-aika (engl. coarse time). Viivästyslinjan antamaa aikaa kutsutaan puolestaan hienoajaksi (engl. fine time).

Vähentämällä karkeasta aikaerosta lopetussignaalin hienoaika ja lisäämällä siihen aloitussignaalin hienoaika saadaan laskettua tapahtuman aikaero  $\Delta t$ . Eli matemaattisesti esitettynä

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \Delta t_{karkea} - \Delta t_{hieno} = (t_{k2} - t_{h2}) - (t_{k1} - t_{h1}), \quad (1)$$

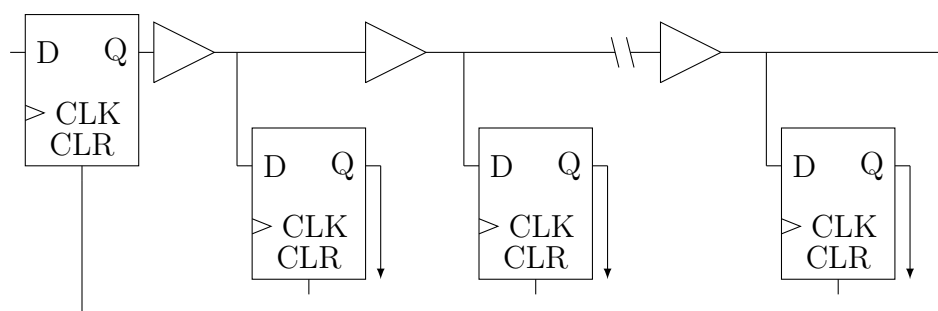
missä  $\Delta t_{karkea}$  on eri kanavien karkeiden aikojen ( $t_k$ ) erotus ja  $\Delta t_{hieno}$  hienojen aikojen ( $t_h$ ) erotus. Kuviossa 3 on havainnollistettu aikaeron laskemista kellosignaalin ja mitattavien signaalien avulla.



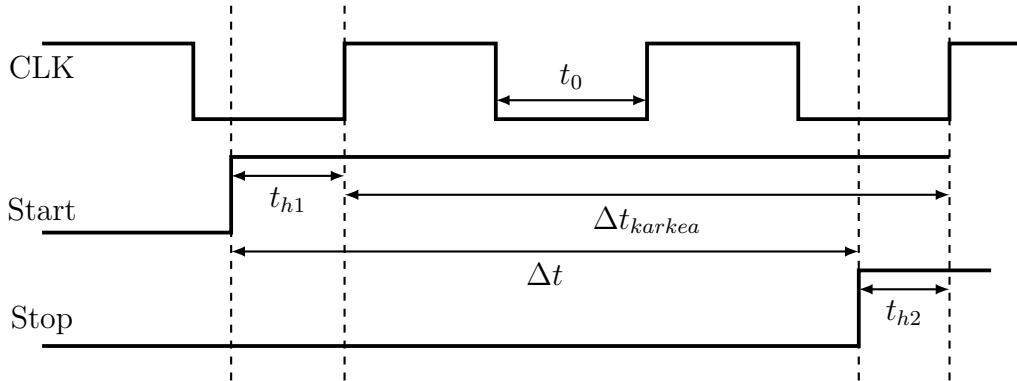
**Kuvio 1.** Aikaeroa mittaavan järjestelmän (engl. time-interval meter, TIM) toimintaperiaate. Fysikaalinen tapahtuma havaitaan kahdella eri ilmaisimella, jonka jälkeen havainnosta saatua signaalia käsitellään siten, että siitä saadaan luettua tapahtuman alkuehki. Lopuksi tapahtumien välinen aikaero  $\Delta t$  saadaan näiden signaalien erotuksesta. [8]

Klassisesti nopeita aikaeroja mittaamaan kykeneviä TDC-järjestelmiä on toteutettu kondensaattorin varauksen purkautumisen avulla, jolloin pieniä aikaeroja venytetään pidemmäksi ja helpommin mitattavaksi. Mitattavan aikaeron  $\Delta t$  aikana kondensaattoria ladataan vakiovirralla  $(I_1 - I_2)$  ja puretaan sitten paljon pienemmällä virralla  $I_2$ . Venytystekijä määritellään  $K = (I_1 - I_2)/I_2$ . Tällöin kondensaattorin purkausaikaa  $T_r$  venytetään venytystekijällä seuraavasti:  $T_r = \Delta t K$ . Kokonaisaika  $(\Delta t + T_r)$  havaitaan nopealla vertailulaitteella ja mitataan yksinkertaisella laskurilla. [8]

Toinen yleisesti käytetty menetelmä aikaerojen mittaamiseen perustuu kondensaattorin varaamiseen vakiovirralla. Ensimmäisen tapahtuman alkaessa kondensaattoria aletaan ladata, ja toisen tapahtuman kohdalla lataaminen pysäytetään. Tällöin aikaero saadaan muutettua jännitteeksi, joka voidaan A/D-muuntimella (engl. ADC, analog-to-digital converter) muuttaa digitaaliseen muotoon. Muunnoksen jälkeen kondensaattori puretaan nopeasti kuolleen ajan pienentämiseksi. Käyttämällä moderneja korkean resoluution A/D-muuntimia voidaan saavuttaa muutamien pikosekuntien aikaresoluutio. [8]



**Kuvio 2.** Haaroitetun viivästyslinjan toimintaperiaate. Viivästyslinjaan saapuva signaali kulkee linjassa olevien puskurien läpi. Jokaisen puskurin jälkeen signaali haarautetaan D-kiikulle, jossa sen saapuminen kirjataan kellojakson vaihtuessa muistiin. Lopuksi D-kiikkujen tallentamat signaalit lasketaan yhteen, jolloin voidaan laskea mihin asti signaali ehti kellojakson aikana.

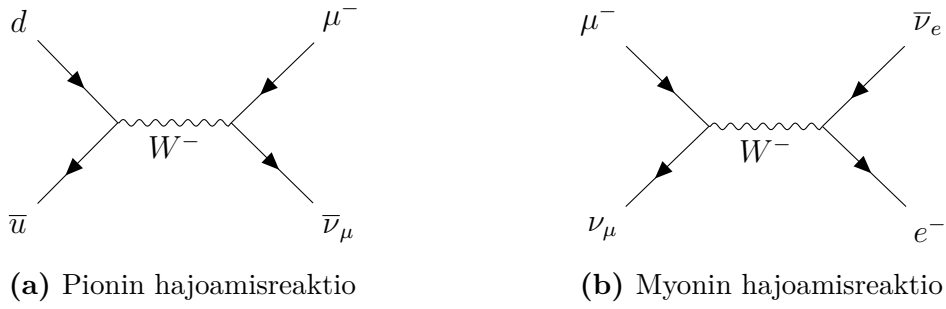


**Kuvio 3.** Aikaeron  $\Delta t$  määrittystä havainnollistava kuvaaja. Kuvaajassa TDC:n kellosignaali (CLK), sekä aloitus ja lopetussignaalit (Start ja Stop). Kuvaajasta on nähtävissä myös karkeisiin aikoihin perustuva aikaero  $\Delta t_{karkea}$ , aloitus ja lopetussignaaleihin liittyvät hienoajat  $t_{h1}$  ja  $t_{h2}$ , sekä kellosignaalin jaksonaika  $t_0$ .

## 2.2 Kosmiset säteet

Kosmiset säteet ovat galaksistamme peräisin olevia suurienergisiä hiukkasia, jotka osuvat Maan ilmakehään. Näiden hiukkasten syntyperä on osin tuntematon, mutta suuren energian vuoksi niiden uskotaan olevan mustien aukkojen törmäysten, supernovien tai muiden samankaltaisten suurienergisten tapahtumien tuottamia. Valtaosa muodostuvista hiukkasista on protoneita, mutta joukossa on myös heliumytimiä sekä pienempiä määriä raskaampien alkuaineiden ytimiä. Ilmakehän hiukkasten kanssa vuorovaikuttaessaan nämä primääriset kosmiset hiukkaset voivat tuottaa uusia hiukkassuihkuja, niin sanottuja sekundaarisia hiukkasia, esimerkiksi mesoneihin kuuluvia pioneja, jotka voivat edelleen hajota uusiksi hiukkasiksi. Tässä työssä havaitut myonit esimerkiksi muodostuvat ilmakehässä sekundaaristen pionien ja kaonien hajoamisreaktioissa heikon vuorovaikutuksen takia. Pionit koostuvat kvarkista ja antikvarkista. Pionin hajoamisreaktio on esitetty Feynmanin diagrammin avulla kuviossa 4a. [2, 9]





**Kuvio 4.** Eräs myonin elinkaari Feynmanin diagrammien avulla esitettynä. Myoneja voi muodostua myös kaonien hajoamisreaktioissa.

Myonit ovat sähköisesti varattuja alkeishiukkasia, jotka kuuluvat leptoneihin. Yksinkertaistaen, myoneja voidaan verrata elektroneihin, jotka ovat tunnetuimpia leptoneita. Molemmilla hiukkasilla on sama sähkövaraus  $-1e$ , mutta myonit ovat yli 200 kertaa raskaampia, painaen noin  $105,66 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ . Lisäksi myonit eivät ole stabiileja hiukkasia, vaan niiden keskimääräinen elinikä on noin  $2,2 \mu\text{s}$ . Pääsääntöisesti myonit hajoavat heikon vuorovaikutuksen kautta neutriinoiksi, antineutriinoiksi ja elektroneiksi kuvion 4b mukaisesti. Koska myonit eivät leptoneina koe vahvaa vuorovaikutusta, ne voivat läpäistä useimmat kohteet siroamatta ja menettämättä energiaa. Noin 63 % merenpinnan tasolla havaittavista kosmisista hiukkasista on myoneja. Yhteenveto myonien ominaisuuksista on esitetty taulukossa 1. [9, 10]

**Taulukko 1.** Myonin perustiedot ja ominaisuudet [2, 11]

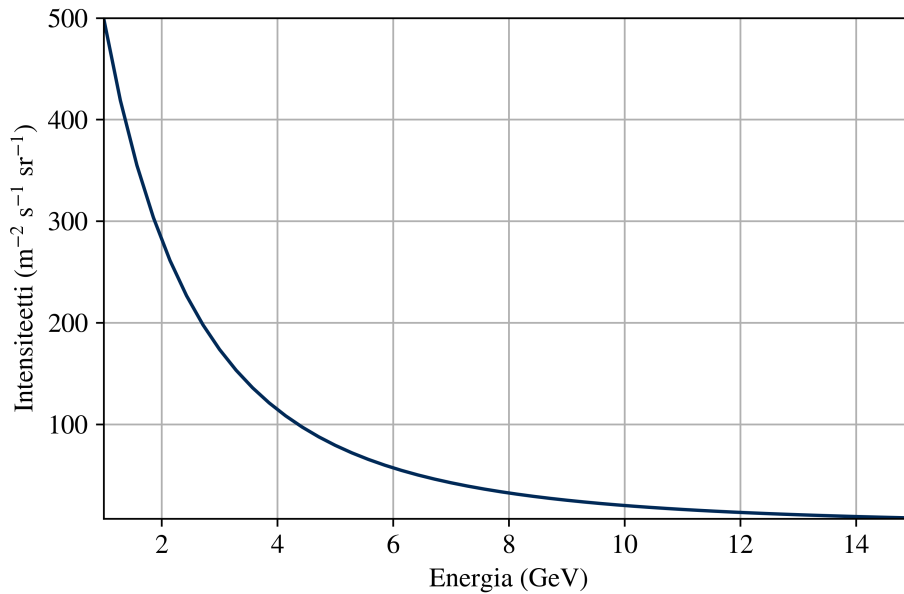
Symboli	$\mu^-$
Perhe	Fermioni
Ryhmä	Leptoni
Vuorovaikutukset	Painovoima Sähkömagneettinen Heikko vuorovaikutus
Massa	$(105,658\,374\,5 \pm 0,000\,002\,4) \text{ MeV}/c^2$
Elinäika	$(2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$
Sähkövaraus	$-1e$
Spin	$1/2$

Koska myonit muodostuvat suurienergisten kosmisten hiukkasten hajoamisen seurauksena, myös niillä itsellään on paljon kineettistä energiaa. Syntyvien myonien energiajakau-

maa voidaan approksimoida seuraavanlaisella yhtälöllä [12]

$$I(E) = I_0 N (E_0 + E)^{-n} \left(1 + \frac{E}{\epsilon}\right)^{-1}, \quad (2)$$

missä  $I_0$  on pystysuorassa tulevien myonien vuo integroituna energian yli,  $N = (n - 1)(E_0 + E_c)^{n-1}$  on normitusvakio,  $E_0$  on myonien energiajättö ilmakehässä ja  $E_c$  on suurin huomioitu energia.  $n$  sekä  $\epsilon$  ovat mittausdataan tehdystä sovituksista saatuja vakioita, joiden suuruudet ovat luokkaa  $n \approx 3$  ja  $\epsilon \approx 854$  GeV. Myonien merenpinnan tasolla mitattu keskimääräinen energia on noin 4 GeV [9]. Muodostuvien myonien energiajakauma on piirrettyä kuviossa 5.

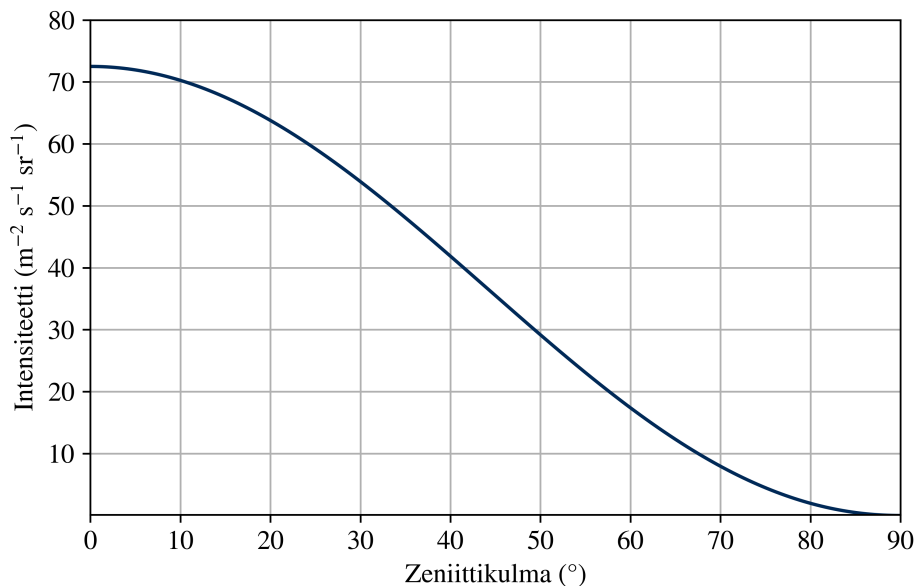


**Kuvio 5.** Yhtälön 2 avulla laskettu myonien energiajakauma. Kuvion piirtämiseen käytetyt parametrit on saatu lähteen [12] taulukon 1 kohdasta, jossa sovituksen referenssinä on käytetty Durhamissa tehtyjä mittauksia. Tässä kuviossa energian raja-arvoksi  $E_c$  on asetettu 15 GeV. Muut parametrit ovat  $I_0 = 72,5 \frac{1}{\text{m}^2 \text{s sr}}$ ,  $n = 3,06$ ,  $E_0 = 3,87$  GeV ja  $\epsilon = 854$  GeV.

Tavallisesti myoneja muodostavat hajoamisreaktiot tapahtuvat stratosfäärissä noin 15 kilometrin korkeudessa. Nämä syntyneet myonit etenevät kartiomaisissa suihkuissa, joiden kulma poikkeaa yleensä noin yhden asteen alkuperäisten hiukkasten liikeradan suunnasta [13]. Merenpinnan tasolle saapuvien myonien kulmajakaumaa voidaan approksimoida seuraavalla yhtälöllä [12]

$$\phi(\theta) = I_0 \cos^{n-1}(\theta), \quad (3)$$

missä  $\theta$  on zeniittikulma eli taivaan ylimmän pisteen ja saapuvan myonin välinen kulma.  $I_0$  ja  $n$  ovat vastaavat kuin edellä. Myonien kulmajakauma merenpinnan tasolla on esitettyä kuviossa 6.



**Kuvio 6.** Yhtälön 3 avulla laskettu myonien kulmajakauma merenpinnan tasolla. Kuvion piirtämiseen käytetyn yhtälön parametrit ovat vastaavat kuin kuviossa 5.

Suhteellisuusteorian vaikutus käy ilmi tarkasteltaessa myonien lyhyttä elinaikaa. Klassisen fysiikan mukaan lähes valonnopeudella matkaava tyypillinen myoni ehtisi kulkea vain noin 660 m ennen kuin se hajoaisi. Kuitenkin myoneja voidaan havaita myös maanpinnalla, vaikka ne syntyvätkin yläilmakehässä. Tämä johtuu suhteellisuusteorian mukaisesta aikadilaatiosta. Pituuskontraktion vuoksi nopeasti liikkuvan myonin lepokoordinaatistossa matka stratosfääristä maan pinnalle lyhenee, jolloin myoni ehtii kulkemaan maahan asti ja jopa maan sisään ennen hajoamistaan. Kun tilannetta tarkastellaan ulkopuolisen tarkkailijan näkökulmasta, tilanteessa tapahtuu aikadilaatio, jolloin myonin ”kello jätättää” ja näin myoni ennättää kulkemaan matkan. Myös se että myoni vuorovaikuttaa vain vähän hiukkasten kanssa auttaa sitä ennättämään maanpinnan tasolle. Merenpinnan tasolla myonivuon taajuudeksi on mitattu noin  $70 \frac{1}{\text{m}^2 \text{s sr}}$  tai toisella tavalla ilmaistuna horisontaalisilla ilmaisimilla noin  $1 \frac{1}{\text{cm}^2 \text{min}}$  [13].

## 2.3 Varattujen hiukkasten vuorovaikutukset

Varatut hiukkaset vuorovaikuttavat pääasiassa atomien kanssa. Nämä hiukkaset voivat irrottaa elektroneja (ionisoituminen), virittää elektroneja korkeammille energiatasoille tai tuottaa fotoneita (jarrutussäteily). Korkean energian hiukkaset voivat myös olla vuorovaikutuksessa suoraan atomiytimien kanssa. Varatuilla hiukkasilla pääosa energiasta kuluu ionisaatioon. Ionisoinnista ja virityksestä aiheutuvaa energian menetystä voidaan arvioida Bethe-Bloch-yhtälöllä. Kyseinen yhtälö on suhteellisen tarkka pienille atomiytimille ja varatuille hiukkasille suurilla energioilla ( $>1$  MeV). Elektronien kohdalla yhtälö ei kuitenkaan päde, sillä elektroneilla jarrutussäteilyn vaikutus energian menetykseen on huomattava. Bethe-Bloch-yhtälö voidaan ilmaista matemaattisesti seuraavasti [14–16]

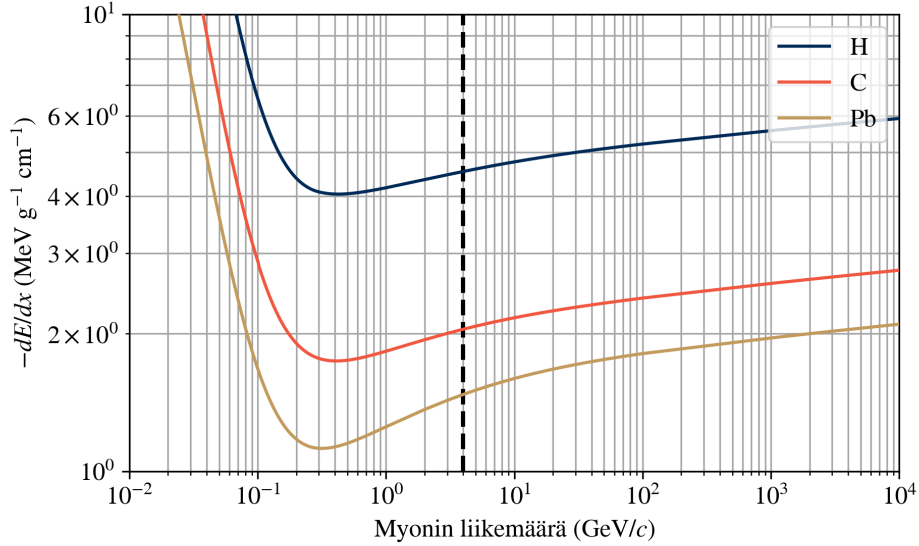
$$\frac{-dE}{dx} = K \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left( \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right), \quad (4)$$

missä

$K$	$= 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \approx 0,307 \frac{\text{MeV}}{\text{g cm}^2}$
$N_A$	$=$ Avogadron vakio $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$
$r_e$	$=$ elektronin säde $\approx 2,82 \times 10^{-15}$ m
$m_e c^2$	$=$ elektronin lepoenergia $\approx 511$ keV
$z$	$=$ hiukkasen sähkövaraus
$A, Z$	$=$ läpäistävän aineen sähkövaraus ja massaluku
$\beta$	$=$ hiukkasen nopeus $= v/c$
$c$	$=$ valonnopeus tyhjiössä $= 299\,792\,458$ m/s
$\gamma$	$= 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
$T_{max}$	$=$ elektronille siirtyvä maksimienergia $\frac{2m_e p^2}{m_0^2 + m_e^2 + 2m_e E/c^2}$
$p, m_0, E$	$=$ hiukkasen liikemäärä, massa ja kokonaisenergia
$I$	$=$ kohdemateriaalin keskimääräinen ionisaatioenergia
$\delta$	$=$ tiheyskorjauskerroin.

Myonien havaitseminen tuikeilmaisimilla perustuu Bethe-Bloch-yhtälön (4) kuvaaman myonin energian vähenemiseen. Ilmaisimissa käytettävä tuikemateriaali on absorboiva materiaali, jota ionisoiva säteily virittää ja josta virityksen purkautuessa emittoituu fotoneita. Kun varatut hiukkaset, kuten myonit tai beetahiukkaset, läpäisevät ilmaisimen ne vuorovaikuttavat tuikemateriaalin elektronien kanssa sähkömagneettisen voiman kautta Coulombin lain mukaisesti. Tämä johtaa tuikemateriaalin atomien ionisaatioon tai virittymiseen. Neutraalit hiukkaset puolestaan vuorovaikuttavat suoraan tuikemateriaalin

atomien ytimien kanssa, tuottaen rekyyliprotoneja tai muita fragmentteja, jotka siirtävät energiansa tukeaineeseen vastaavasti kuin varautuneet hiukkaset. Kuviossa 7 on laskettu myonin jarruuntumista liikemäärän funktiona. Kuviosta voidaan havaita, että myonin jarruuntuminen ( $-dE/dx$ ) riippuu voimakkaasti sen energiasta. Tuikemateriaaleille jarruuntuminen on tyypillisesti noin 10 MeV/cm vähimmäisionisoiville hiukkasille. [15]



**Kuvio 7.** Bethe-Bloch-yhtälöllä laskettu myonin energian menetys eri väliaineissa liikemäärän funktiona. Kuvaajaan on mustalla katkoviivalla merkitty myonien keskimääräinen liikemäärä 4 GeV/c. Kullekin aineelle tiheyskorjauskerroin on saatu lähteestä [16].

## 2.4 Valon käyttäytyminen tuikemateriaalissa

Ideaalisessa tilanteessa tuikemateriaalin läpi kulkeva myoni virittää tuikemateriaalin atomeja, jolloin virityksen purkautuessa syntyy fotoneja. Nämä fotonit puolestaan kulkeutuvat suoraan niitä havaitsevalle valoilmaisimelle. Käytännössä syntyvät fotonit kuitenkin hajaantuvat isotrooppisesti ja kokonaisheijastuvat tuikemateriaalin pinnoista. Kuviossa 8 on hahmoteltu fotonien mahdollisia kulkuja tuikemateriaalissa. Osa fotoneista voi myös saapua tuikemateriaalin rajapintaan liian suuressa kulmassa, jolloin ne poistuvat tuikemateriaalista ilman että niitä havaittaisiin ilmaisimella. Jotta mahdollisimman monet syntyvistä fotonista havaittaisiin, voidaan tuikemateriaali päällystää heijastavalla materiaalilla, kuten alumiinilla tai titaanioksidilla. Tutkimuksessa käytetyssä ilmaisimessa tätä menetelmää ei kuitenkaan ollut käytetty.

Tässä tutkimuksessa käytetyssä ilmaisimessa tuikemateriaali oli muotoiltu kiekon muotoon ja valoilmaisimet sijoitettiin kiekon kylkiin. Ala- ja yläpinnan kautta tuikemateriaalista karkaavien fotonien osuutta voidaan arvioida käyttäen Snellin lakia, kun oletetaan myonin synnyttämien fotonien lähtevän isotrooppisesti eri suuntiin. Snellin laki kuvaa sähkömagneettisen säteilyn taittumista kahden optisesti eri tiheyksisen aineen rajapinnassa. Snellin laki esitetään tavallisesti matemaattisesti seuraavasti

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (5)$$

missä  $n_1$  ja  $n_2$  ovat rajapinnassa olevien materiaalien taitekertoimet,  $\theta_1$  säteilyn tulokulma rajapinnan normaalin suhteen ja  $\theta_2$  säteilyn lähtökulma rajapinnan normaalin suhteen. Tuikemateriaalina käytetyn aineen taitekerroin on  $n_{\text{tuike}} = 1,58$  [17], jolloin kokonaisheijastuksen rajakulmaksi ( $\theta_2 = 90^\circ$ ) ilman kanssa ( $n_{\text{ilma}} \approx 1,0003$ ) saadaan  $\theta_1 = 39,28^\circ$ . [18]

Kokonaisheijastuksen rajakulmaa hyväksikäyttäen voidaan ratkaista se osuus pallon alasta, jolle osuneet fotonit kulkeutuvat suoraan pois tuikemateriaalista. Pallosegmentin ala, jolta fotonit karkaavat, saadaan yhtälöllä

$$A_{\text{segmentti}} = 2\pi r_1 h, \quad (6)$$

missä  $r_1$  on segmentin pohjan säde ja  $h$  on segmentin pohjaa vastaan kohtisuora korkeus. Pallon kokonaispinta-ala voidaan ratkaista yhtälöstä

$$A_{\text{pallo}} = 4\pi r_2^2. \quad (7)$$

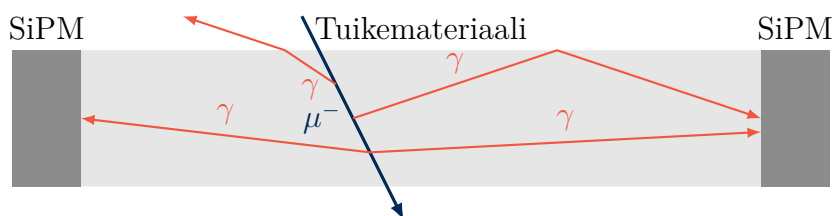
Trigonometrian avulla voidaan selvittää pallon säde  $r_2$  ja pallosegmentin korkeus  $h$  rajakulmasta  $\theta_1$ . Tämän jälkeen voidaan verrata pallosegmentin ja pallon pinta-alojen suhdetta

$$\frac{A_{\text{segmentti}}}{A_{\text{pallo}}} = \frac{2\pi r_1 h}{4\pi r_2^2} = \frac{C \tan(\theta_1) \left( \frac{C}{\cos(\theta_1)} - C \right)}{2 \left( \frac{C}{\cos(\theta_1)} \right)^2} = \frac{\sin(\theta_1)(1 - \cos(\theta_1))}{2}. \quad (8)$$

Tulokseksi saadaan, että noin 14 % muodostuneista fotoneista karkaa suoraan ulos tuikemateriaaliekikosta, sen alta ja päältä. Tähän karkausprosenttiin vaikuttaa merkittävästi tuikemateriaalin taitekerroin, jonka myötä merkittävä osa muodostuneista fotoneista kokonaisheijastuu ja jää tuikemateriaalin sisään. Kuitenkin rakennetussa ilmaisimessa valtaosa syntyvistä fotoneista jää havaitsematta valoilmaisinsiruilla, sillä ne pääsevät karkuun kiekon sivuilta kohdista, joissa ei ole ilmaisimia. Havaittavien fotonien määrää voidaan

kasvattaa asettamalla useampia valoilmaisimia, tai käyttämällä erillisiä valonohjaimia keräämään fotoneja tehokkaammin ilmaisimille.

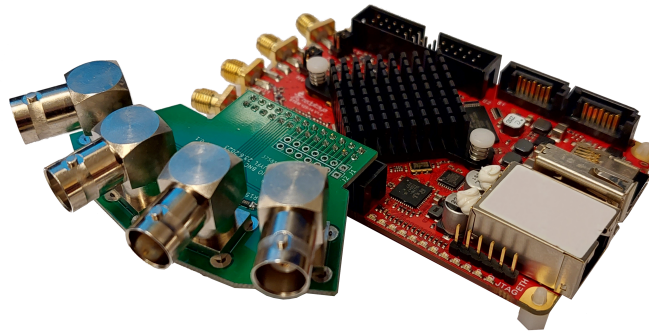
Eljen Technologyn valmistaman EJ-200 tuikemateriaalin [17] fotonien maksimituoton aallonpituus on 425 nm, jolloin yksittäisen fotonin energia on noin  $2,917 \times 10^{-6}$  MeV. Bethe-Bloch-yhtälön mukaan työssä käytetyllä 6 mm paksulla tuikemateriaalilevyllä 2000 MeV energialla varustetun myoni menettää energiaa noin 2,49 MeV. Tuikemateriaalin valmistajan mukaan tuikemateriaali tuottaa noin 10000 fotonia yhtä megaelektronivolttia kohti [17], mikä tarkoittaa että tuikemateriaalissa syntyy noin 25000 fotonia yhden myonin läpäistessä sen. Syntyvien fotonien määrä voi olla huomattavasti suurempikin, mikäli myoni saapuu tuikemateriaaliin kohtisuorasta poikkeavassa kulmassa, jolloin sen tuikemateriaalissa kulkema matka on pidempi.



**Kuvio 8.** Yksinkertainen esimerkkipiirros myonin ( $\mu^-$ ) tuikemateriaalissa aiheuttamista fotoneista ( $\gamma$ ) ja niiden kulkeutumisesta valoilmaisimille. Todellisuudessa fotoneja lähtee ionisaation seurauksena kaikkiin suuntiin, minkä lisäksi tuikemateriaalin pinnasta heijastuvilla fotoneilla tapahtuu myös hajaheijastusta, jossa fotoneja siroaa eri suuntiin. Tutkimuksen kohteena olleessa ilmaisimessa valoilmaisimina käytettiin SiPM-siruja (engl. silicon photomultiplier), joiden toiminnasta on kerrottu enemmän luvussa 4.3.1. [1]

### 3 TDC-järjestelmä

Tässä kappaleessa esitellään työssä toteutettu aika-digitaalimuunnin eli TDC-laitteisto. Aika-digitaalimuunnin toteutettiin Red Pitayan valmistamalle STEMLab 125-14 laskenta- ja signaalinkäsittelykortille. Kortin ohjelmisto on avointa lähdekoodia ja sen laskentatehosta vastaa Xilinxin valmistaman Zynq-7010-järjestelmäpiiri (FPGA ja ARM-suoritin). Kortin ohjelmoitavalla porttimatriisilla eli FPGA:lla (engl. field-programmable gate array) toteutettiin kaksikanavainen TDC. Kuva mittauksissa käytetystä kortista on nähtävillä kuviossa 9.



**Kuvio 9.** Työssä käytetty Red Pitaya STEMLab 125-14 mittaus- ja signaalinkäsittelykortti, johon on liitetty BNC-kaapeleiden liittämistä varten teetetty laajennus. Kuvasta on peitetty kortin verkkotiedot ja yksilöivät tunnisteet.

Toteutetun TDC:n molemmissa kanavissa oli oma aikalaskuri, 192-kanavainen TDL ja  $2048 \cdot 64$  bittinen BRAM (engl. Block Random Access Memory). BRAMilta aikaleimat luettiin Red Pitayan ARM-suorittimella toimivan TCP-palvelimella (engl. Transmission Control Protocol), josta ne lähetettiin ethernet kaapelin välityksellä erillisellä tietokoneella suoritettulle TCP-asiakassovellukselle. Aikaleimoihin liittyvä jälkikäsitely ja mitattujen signaalien aikaerojen laskeminen suoritettiin samaisella asiakassovelluksella.

TDC:n pohjana toimi Michel Adamičín suunnittelema toteutus [19], johon tehtiin merkittäviä muutoksia. FPGA:n osalta tärkeimmät muutokset olivat siirtyminen 32-bittisistä aikaleimoista suurempiin 64-bittisiin aikaleimoihin ja tämän muutoksen myötä mahdolliseksi tullut siirtyminen 24-bittisestä merkittävästi pidemmän 40-bittisen karkea-ajan käyttöön sekä TDC-kanavatunnisteen lisääminen aikaleimaan. Pidempi karkea-aikaleima mahdollis-



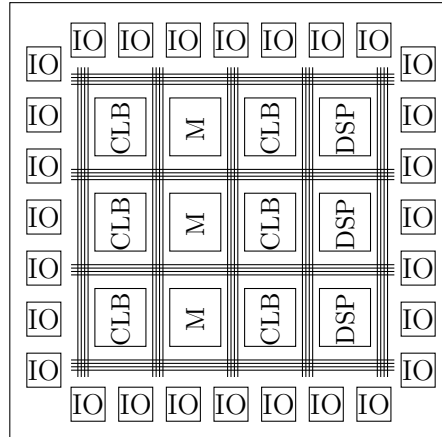
taa pidemmät mittaukset, ennen kuin aikaleimalaskuri pyörähtää ympäri. Nämä muutokset mahdollistuivat, kun vanhan aikaleiman tyhjät bitit otettiin hyötykäyttöön ja ylimääräinen liipaisinosa poistettiin. Muutoksien vuoksi aikaleimoja vastaanottava TCP-asiakassovellus suunniteltiin ja toteutettiin kokonaan uudelleen Python-ohjelmointikielellä.

### 3.1 FPGA

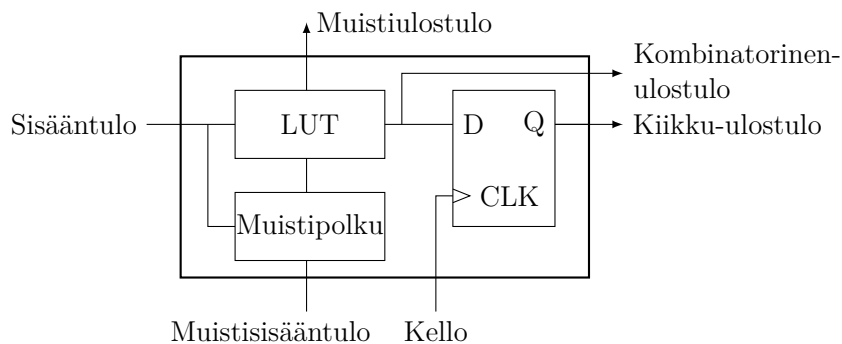
Nopeiden signaalien havainnointia ja erottelua varten tarvitaan erittäin nopea TDC-toteutus, eli käytännössä rautatason ratkaisu. Lisäksi rautatason ratkaisu mahdollistaa tehokkaan rinnakaistuvan toteutuksen jokaiselle TDC kanavalle. Koska erikoisjärjestelmäpiirien suunnittelu ja tutkiminen on hidasta ja kallista, päädyttiin tässä työssä käyttämään prototypoinnissa tyypillisesti käytettävää FPGAa. Tällaisessa tapauksessa FPGA on myös riittävän suorituskykyinen käytettäväksi lopullisessa sovelluksessa.

FPGA on erityinen integroitu piiri, joka koostuu ohjelmoitavista loogisista porttirakenteista, joita voidaan muokata ja säätää piirin valmistamisen jälkeen. Määritelmällisesti FPGA on säädettävistä logiikkalohkoista (eng. configurable logic blocks, CLB) koostuva matriisi, jotka linkittyvät toisiinsa ohjelmoitavalla linkkiverkolla. Lisäksi piirillä voi olla myös muistisoluja ja signaalinkäsittelyyn erikoistuneita lohkoja (eng. digital signal processing, DSP) FPGA:n perusarkkitehtuuria on havainnollistettu kuviossa 10 ja säädettävien logiikkalohkojen rakennetta kuviossa 11. Järjestelmää hallitaan muistisolulla, joilla voidaan ohjata matriisien välisiä linkityksiä ja logiikkalohkoja. FPGA:n avulla voidaan siis suorittaa rautatason ohjelmointia, ilman että jokaista toteutusta varten täytyisi valmistaa uutta järjestelmäpiiriä. [20]

FPGA:n kellotaajuus asetettiin 350 MHz:iin, koska tällöin FPGAlla toteutettu järjestelmä kykeni vielä saavuttamaan annetut aikarajoitteet. Koska tämä kellotaajuuden antama tarkkuus ei vielä riitä nopeiden signaalien erotteluun, toteutettiin piiriin lisäksi haarautettu viivästyslinja. Käytetyssä TDL-toteutuksessa viivästyslinjassa oli käytössä 192 haaraa, joskin ainoastaan 165 näistä havaittiin signaalia, koska TDL:n pituus on suurempi, kuin signaalin kellojaksossa kulkema matka. Linjan viive-elementit saatiin toteutettua Xilinxin CARRY4 primitiivien avulla. CARRY4 on erittäin nopea siirtolinja, joka muodostuu neljän multiplekserin ja neljän XOR portin yksiköstä [22]. Nopea siirtolinja mahdollistaa tehokkaiden aritmeettisten toimintojen, kuten laskureiden, toteutuksen. TDC:n ohjelmointi Zynq-7010-järjestelmäpiirille suoritettiin Xilinxin Vivado-kehitysohjelmistolla. Visualisaatio TDC-järjestelmän eri osien sijoittumisesta FPGA-piirille on esitettyä kuviossa 12.



**Kuvio 10.** Generisen FPGA:n perusarkkitehtuuri. Piiri koostuu sisään-/ulostulolinjoista (IO), säädettävistä logiikkalohkoista (CLB) sekä ohjelmoitavasta linkkiverkosta. Lisäksi piirillä voi olla myös muita erikoistuneita lohkoja, kuten muisti- (M) ja signaalinkäsittelylohkoja (DSP). [21]

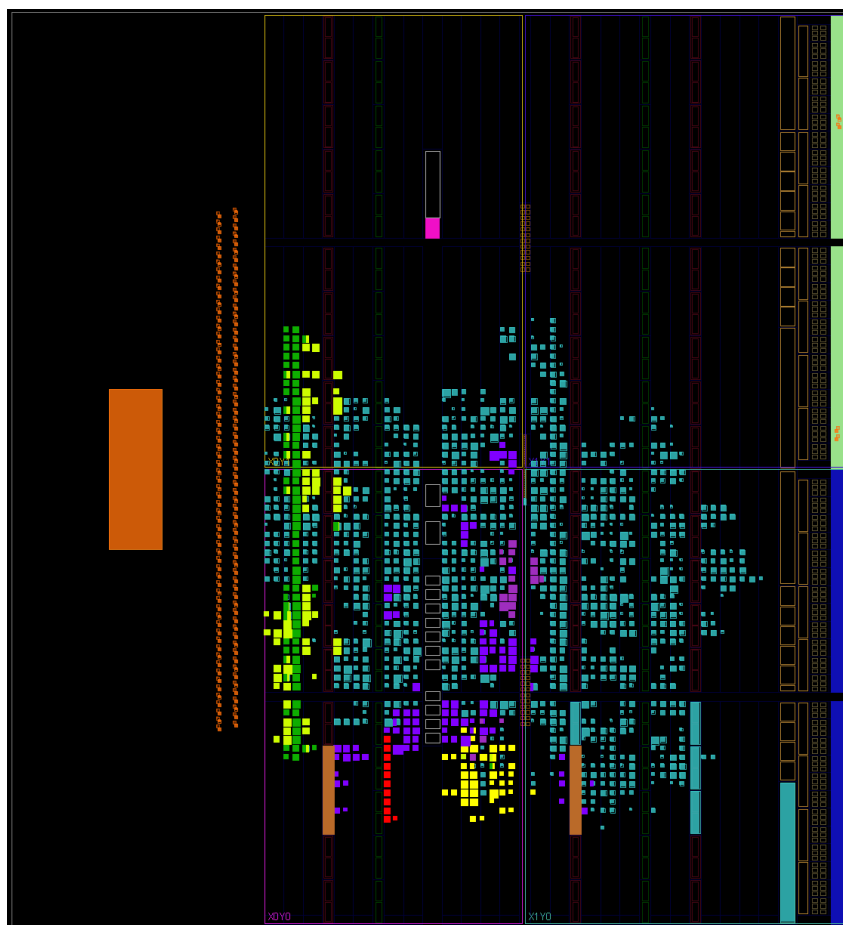


**Kuvio 11.** FPGA:n säädettävän logiikkalohkon perusrakenne. Rakenne koostuu hakutaulukosta (eng. lookup table, LUT), joka voidaan konfiguroida joko ROM- tai RAM-muistiksi tai kombinatoriseksi funktioksi. Muistipolku mahdollistaa tehokkaat aritmeettiset operaatiot. Lisäksi D-tyyppinen kiikku mahdollistaa logiikkasolun lähdön tallentamisen muistiin. [20]

Yksittäisen tapahtuman tarkka aikaleima saatiin yhdistämällä TDL:stä saatava tieto kellosignaalin karkeaan (engl. coarse) ajoitukseen. Käytännössä 64-bittinen aikaleima koostui siis viisibittisestä kanavatunnisteesta, yhdentoista bitin pituisesta liipaisintunnisteesta, 40:sta kellolaskurin antamasta bitistä, sekä kahdeksasta viivästyslinjan bitistä. 40-bittinen kellolaskuri yhdessä 350 MHz referenssikellon kanssa mahdollistaa teoriassa

$$t_{mittaus} = \frac{2^{40}}{350 \text{ MHz}} \approx 3141 \text{ s} \approx 52 \text{ min}$$

pituisen mittauksen ennen kuin kellolaskuri pyörähtää ympäri. Aikaleimaa on havainnollistettu kuviossa 15.



**Kuvio 12.** TDC:n implementaatio Zynq-7010-järjestelmäpiiriin FPGAlla. Kuvassa on merkitty punaisella värillä toisen TDC:n kanavan logiikkalohkot, jotka vastaavat kellolaskurin toiminnasta ja tumman vihreällä värillä saman kanavan haaroitettu viivästyslinjasto. Lisäksi kuvassa on merkittynä vaaleanvihreällä värillä viivästyslinjaston haarojen summaamiseen käytetty logiikka, keltaisella värillä TDC:n ohjauslogiikka ja ruskealla värillä BRAM lohkot. Kuva on otettu Xilinxin Vivado kehitysohjelmistosta.

### 3.2 Haaroitetun viivästyslinjan kalibrointi

Tarkkaa elektroniikkaa vaativat sovellukset ovat tavallisesti herkkiä lämpötilan sekä jännitetasojen vaihteluille, eivätkä FPGA:t ole tästä poikkeus [23]. Koska TDC-järjestelmän haaroitetulla viivästyslinjalla mitataan erittäin lyhyitä, alle nanosekunnin aikaeroja, tulee se kalibroida säännöllisesti. Samalla kalibraatiossa huomioidaan epälineaarisuuskorjauksella (engl. correction of non-linearity), että FPGA:lla toteutetun TDL:n haarojen pituudet vaihtelevat. Koska kyseessä ei ole erityisesti viivästyslinjastoksi suunniteltu ratkaisu, voivat haarojen pituuksien vaihtelut olla suhteellisen suuria. Tämän takia toiset haarat ovat epätarkempia kuin toiset, mikä on merkittävin epävarmuuden lähde TDC:ssä. Havainnollistus haarojen pituuseroista on nähtävissä kuvion 13 kalibraatiohistogrammeista ja kuvion 14 kalibraatiokäyristä. [8]

Kalibraatio suoritetaan tallentamalla 65536 tapahtumaa, joiden aikaleimoista katsotaan mihin kanavaan asti mikäkin signaali ehti. Kun tapahtumat oletetaan tasajakautuneeksi viivästyslinjan sisällä, voidaan jakauman erojen perusteella laskea jokaiselle haaralle sen leveys ajassa. Matemaattisesti kalibraatio voidaan esittää seuraavasti.

$$\Delta W_i = \frac{n_i}{f \sum_i n_i}, \quad (9)$$

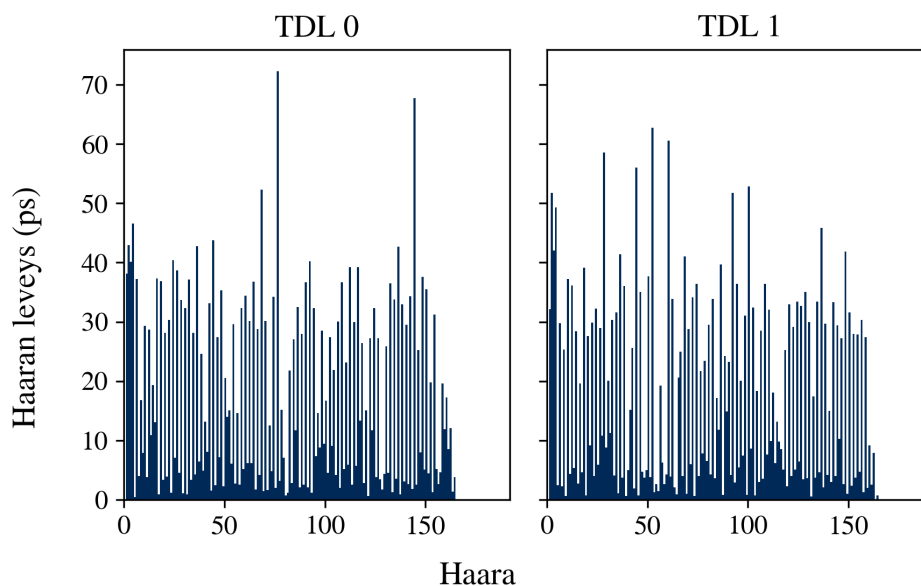
missä  $\Delta W_i$  on  $i$ :n haaran leveys,  $n_i$  on kyseiseen kanavaan tulleiden signaalien lukumäärä ja  $f$  on TDL:n referenssikellon taajuus. Tästä voidaan nyt puolestaan laskea haaran hienoaika seuraavasti

$$T_i = \sum_{k=i}^{i-1} W_k + \frac{W_i}{2}. \quad (10)$$

### 3.3 Aikaleimojen luominen ja käsittely

Kun TDC:n kellojakso vaihtuu, viivästyslijaston D-kiikkujen bitit summataan yhteen. Tämä ykkösbittien laskeminen tapahtuu useammassa osassa, jotta summaus sujuisi mahdollisimman nopeasti. Summaamalla kiikkujen bitit päästään samalla eroon mahdollisista "kuplista". Esimerkiksi TDL:n antamat bitit 11110000 voivat näkyäkin muodossa 11101000. Huolimatta siitä, että lopussa on "kupla", merkitsevien bittien määrä pysyy samana. Tällaisia kuplia voi muodostua esimerkiksi referenssikellon vinoutumisen tai näytteenotto-kiikkujen metastabiilisuuden vuoksi [24]. Summaimen arkkitehtuuri on esitelty tarkemmin lähteessä [24].

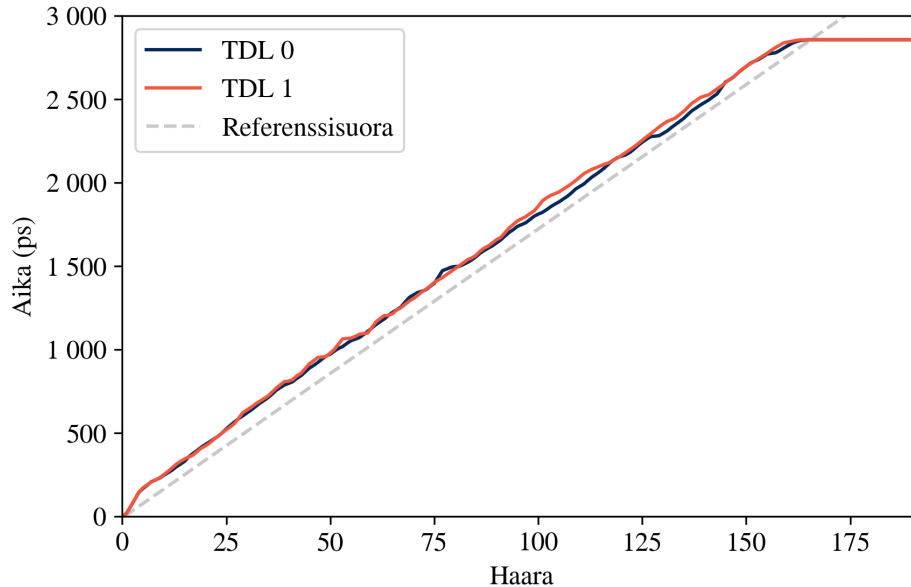
TDL:n bittien summaamisen jälkeen FPGA:lla muodostetaan varsinainen 64-bittinen



**Kuvio 13.** TDC:n haaroitetujen viivästyslinjojen kalibraatiohistogrammit. Toteutuissa viivästyslinjoissa on kummassakin 192 haaraa, mutta ainoastaan 164 näistä ehtii vastaanottamaan signaalin kellojakson aikana. Haarojen keskimääräinen leveys on 17,42 ps, mutta joukossa on myös huomattavasti pidempiä ja lyhyempiä haaroja.

aikaleima, jonka rakenne on esitetty kuviossa 15. Eli käytännössä aikaleimalle varattuun muistilohkoon kirjoitetaan TDL:n bittien summa, referenssikellolaskurin lukema, aikaleiman muistiosoitteen sijainti, sekä tieto kummasta TDC:n kanavasta aikaleima on peräisin.

Tallennettuja aikaleimoja luetaan laskentakortilla olevan Linux palvelimelle AXI-rajapinnan kautta. Tältä palvelimelta aikaleimat lähetetään edelleen TCP-protokollaa käyttäen erilliselle datankeruutietokoneelle, jossa aikaleimojen tallennus ja jäsentely tapahtuu. Aikaleimojen jäsentelyssä poistetaan mahdolliset korruptoituneet aikaleimat ja suoritetaan koinsidenssien haku. Kun toisiaan vastaavat aloitus- ja lopetusaikaleimat ovat löytäneet, ohjelma laskee näiden välisen aikaeron.



**Kuvio 14.** TDC:n haaroitetujen viivästyslinjojen kalibraatiokäyrät. Kuvaajaan on piirretty hienoaikaleiman ja ajan välinen kalibraatiokäyrä pikosekunteinä. Ihanneta-pauksessa, jos kaikki haarat olisivat yhtä leveitä, käyrät vastaisivat referenssisuoraa, joka on piirretty kuvaan harmaalla katkoviivalla. Mitatut sinisellä ja oranssilla merkityt viivästyslinjojen kuvaukset poikkeavat tästä suorasta, haarojen erilaisten aikaleveyk-sien vuoksi. Mitä leveämpi haara on, sitä jyrkempänä muutoksena se näkyy käyrässä.

ID	Liipaisin	Kellolaskuri	TDL
63	58	47	7 0

**Kuvio 15.** Toteutetun TDC-järjestelmän antamien aikaleimojen rakenne. TDC antaa jokaiselle havaitulle tapahtumalle oman 64-bittisen aikaleiman, joka koostuu 4 osasta. Ensimmäinen osa on viiden bitin kokoinen tunniste, joka kertoo mistä TDC:n kanavasta aikaleima tulee, liipaisi osa pitää sisällään tapahtuman sijainnin BRAMilla, kellolaskuri osassa on 40-bittinen laskuri, joka kasvaa yhdellä jokaisessa kellojaksossa ja TDL pitää sisällään viivästyslinjasta laskettujen ykkösten lukumäärän.

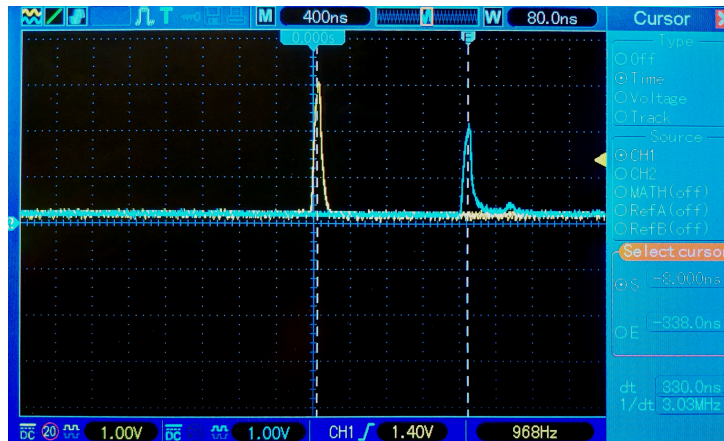
## 4 Kokeelliset menetelmät

Tässä kappaleessa esitellään TDC:n tutkimisessa käytetyt ilmaisimet ja menetelmät. Mittauksien tavoitteena oli selvittää rakennetun TDC:n suorituskyky, sekä sen soveltuvuus rakennettuun myoni-ilmaisimeen lentoaikalaskuriksi. Työhön liittyvät mittaukset suoritettiin Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksella vuoden 2023 lopulla ja vuoden 2024 alussa.

Adamičin omalla järjestelmällään suorittamissa tutkimuksissa oli käytetty tutkittavana signaalina signaaligeneraattorista peräisin olevaa matalataajuista signaalia, joten tämä oli luonteva lähtökohta uudenkin toteutuksen mittauksissa [19]. Tämän lisäksi järjestelmää haluttiin kuitenkin tutkia myös enemmän tutkimuskäyttöä muistuttavissa mittauksissa. Tämän vuoksi laitteistolla suoritettiin mittauksia myös ilmaisimista peräisin olevilla signaaleilla.

### 4.1 Signaaligeneraattoritutkimukset

TDC-järjestelmää tutkittiin analogisen signaaligeneraattorin ympärille rakennetun tutkimusasetelman avulla. Tutkimusasetelmassa Berkeley Nucleonics Corporation Model 8010 signaaligeneraattorin tuottama signaali haaroitettiin ja kumpikin haara ohjattiin LeCroy Corporation valmistamalle LRS model 688AL tasoadapterille, jotta käytetty jännite saatiin halutulle, TTL-logiikan mukaiselle tasolle. Tämän jälkeen toinen signaalin haara ohjattiin lyhyellä kaapelilla Red Pitayalle TDC:n 1. kanavaan, kun taas toista signaalia viivästettiin pidemmän kaapelin avulla ennen sen saattamista TDC:n 2. kanavaan. Kuviossa 16 on oskilloskoopin avulla kuvattuna miltä tällainen signaali näyttää TDC:n näkökulmasta. Lisäksi tutkimuksissa, joissa signaalien välinen aikaero haluttiin suuremmaksi ( $> 300$  ns) käytettiin Keysight 33600A Series Trueform signaaligeneraattoria, jolla aikaero eri kanavien välillä toteutettiin vaihe-eron avulla. Kaavio mittaussasetelmasta kuviossa 18.



**Kuvio 16.** Pulssigeneraattorin tuottama signaali (keltainen) ja siitä haarautettu ja viivästetty toinen signaali (sininen), kuvattuna Hantek DSO5202B oskilloskoopin näytöltä.

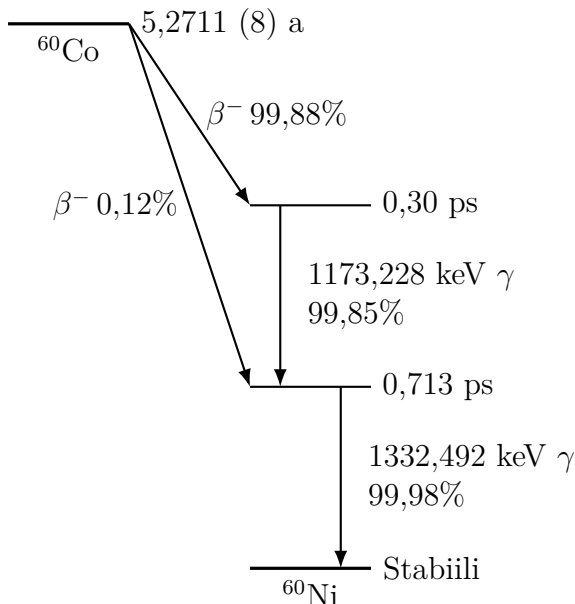
## 4.2 Gammailmaisin

Todenmukaisen ja luotettavan ajanmittaustilanteen luomiseen käytettiin gammasäteilyn mittausta. Gammailmaisimina toimi cerium-seostetut lantaanibromidi ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ) -tuikeilmaisimet.  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ -ilmaisimet ovat epäorgaanisia tuikeilmaisimia, joille on tunnusomaista suuri valontuotto, nopea aikavaste ja hyvä energiaresoluutio. [25]

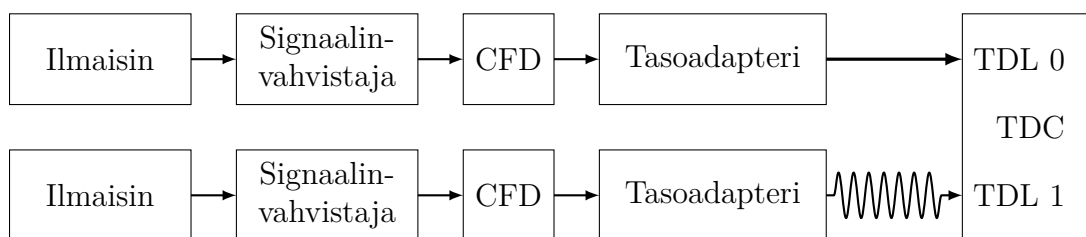
Ilmaisimien toimintajännite tuotettiin LeCroy Model HV4032A High Voltage Power System -jännitelähteellä. Ennen signaalin viemistä TDC linjoihin sitä vahvistetaan ORTECin Model 434 Timing Filter AMP -vahvistimella, minkä jälkeen signaalia liipaistaan ORTECin Model 934 Quad Constant-fraction 100-MHz Discriminator vakio-osaerottimella (engl. Constant fraction discriminator, CFD), joka tuottaa logiikkakorkea NIM-signaalin (0,8 V), kun signaalin nousu on 20 % maksimiarvostaan. Tämän jälkeen NIM-signaali ajetaan vielä LeCroy Corporation valmistaman LRS model 688AL tasoadapterin läpi, jotta saadaan Red Pitayalle sopiva TTL-signaali.

Mittauksissa gammalähteenä käytettiin koboltti-60-umpilähdettä. Koboltti-60 hajoaa  $\beta$ -hajoamisella nikkeliksi, muodostaen samalla kaksi gammafotonia, joiden energiat ovat 1,17 ja 1,33 MeV,  ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^{-} + 2\gamma$ . Yksinkertaistettu kobolttin hajoamiskaavio on esitetty kuviossa 17.





**Kuvio 17.** Koboltti-60:n yksinkertaistettu hajoamiskaavio. [26]



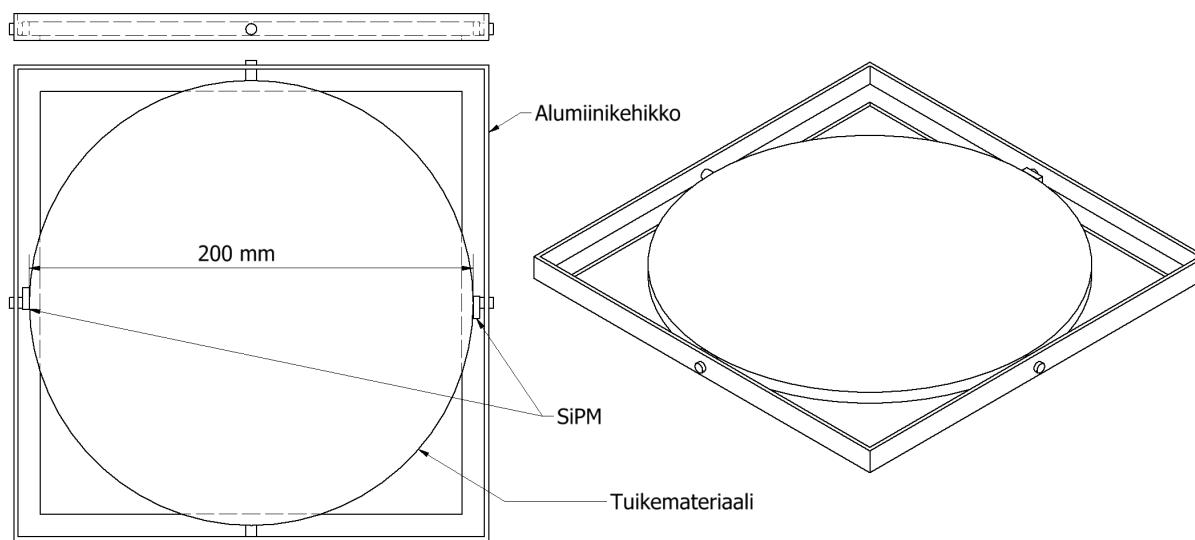
**Kuvio 18.** Ilmaisimella toteutettujen mittausten mittausjärjestelmä. Aaltoilevalla viivalla kuvataan pitkällä kaapelilla signaaliin aiheutettua viivettä. Lisätyllä viiveellä varmistettiin lopetussignaalin saapuminen laitteistolle aloitussignaalin jälkeen. Signaaligeneraattoria hyödyntävissä mittauksissa generaattorin tuottama signaali kytkettiin suoraan tasoadapterille ja siitä edelleen TDC:n viivästyslinjoihin.

### 4.3 Myoni-ilmaisim

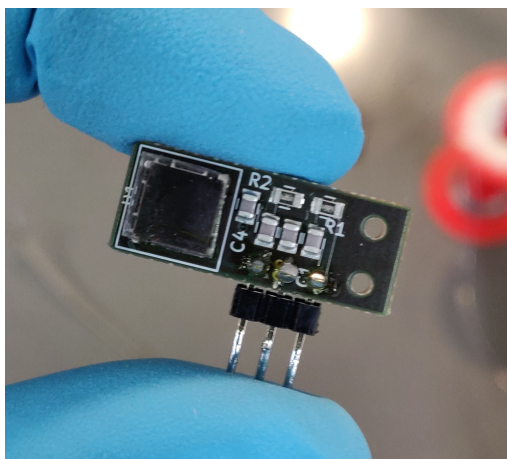
Ilmaisinelaitteiston suunnittelun pohjana toimi aikaisemmin tutkittu ja rakennettu MOTTI-järjestelmä (myonien observointiin tarkoitettu tuikemateriaali-ilmaisim) [1]. Kyseisen järjestelmän on tarkoitus olla helposti liikuteltava demonstraatiolaitteisto, jolla voidaan havainnollistaa modernia fysiikkaa.

Ilmaisinelaitteisto rakentuu kahdesta Eljen Technologyn valmistamasta EJ-200 polyviinylitolueenipohjaisesta tuikemateriaalikielkosta (halkaisija 200 mm, paksuus 6 mm), Red Pitaya STEMLab 125-14 mittaus- ja signaalinkäsittelykortista, kahdesta ON Semiconductorin valmistamasta C-Series SiPM 6x6 mm<sup>2</sup> valoilmaisimesta (kuviossa 20) sekä bias-jännitteen tuottavasta jännitelähteestä (BK Precision 9174).

SiPM-valoilmaisimet asetettiin kiinni tuikemateriaalikielkkojen vastakkaisille kyljille havainnoimaan materiaalissa emittoituvia fotoneja. Sirujen kiinnittämisessä tuikemateriaaliin käytettiin EJ-560 optista silikoni-kumi -tyynyä varmistamaan optinen yhteys, sekä muovisia kierrerruuveja pitämään sirut ja tuikemateriaalikielko paikoillaan. Laitteiston kehikko oli rakennettu L-mallisesta alumiinilistasta. SiPM-siruille asetettiin 29 V estojännite Tenma 72-10480 tehollähteellä. Kaavakuva yksittäisen ilmaisinyksikön rakenteesta on kuviossa 19. Ennen signaalin päätymistä TDC:lle, SiPM:iien tuottamaa signaalia käsiteltiin vastaavasti kuin gammailmaisimen kohdalla.



**Kuvio 19.** Kaavakuva suunnitellusta myoni-ilmaisimrakennelmästä, joka havainnollistaa rakenteen eri osia. Mittauksissa käytetyssä ilmaisimessa oli kaksi tuikemateriaalikielkon vastakkaisille puolille asetettua SiPM-sirua. Ilmaisim tukikehikkoineen paketoitiin vielä paksulla pahvilla, jotta hajavaloa ei pääsisi tuikemateriaaliin tai SiPM-siruille.



**Kuvio 20.** Kuvassa on eräs mittauksissa käytetyistä ON Semiconductorin C-Series  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  SiPM-siruista. Piirillä näkyvä tumma neliö on varsinainen ilmaisiosa, joka kiinnitettiin tuikemateriaaliin puristamalla. [1]

Mittausten ajaksi ilmaisimien asetettiin metallikehikkoon, jonka avulla SiPM-sirut saatiin puristettua tukevasti tuikemateriaalin kylkiä vasten. Kehikon ympärille asetettiin paksusta päällystetystä pahvista valmistettu kotelo, jonka läpi kaapelit vedettiin. Lopuksi kaikki mahdolliset raot, joista hajavaloa voisi päästä tuikemateriaalille, peitettiin mustalla teipillä.

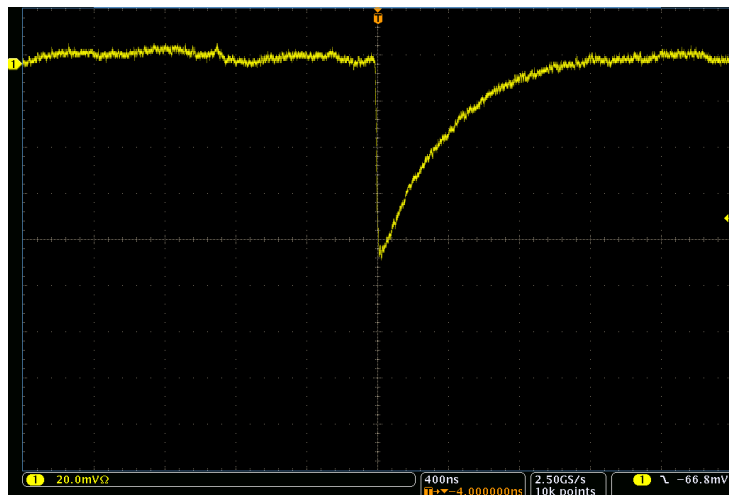
#### 4.3.1 SiPM-ilmaisimen toiminta

Piipohjainen valoilmaisin (engl. silicon photomultiplier, SiPM) on fotonien havaitsemiseen tarkoitettu siru, joka vastaa käyttötarkoitukseltaan perinteisiä valomonistinputkia. Toisin kuin valomonistinputket, SiPM-sirut ovat verrattain edullisia, minkä lisäksi ne eivät tarvitse useiden tuhansien volttien käyttöjännitettä. SiPM-sirut kykenevät havaitsemaan fotoneja UV- ja näkyvän valon spektreissä. Näiden sirujen toiminnan pohjana ovat sarjaan kytketyt valodiodit (eng. Single-photon avalanche diode, SPAD), joissa jo yksittäinen fotoni aiheuttaa lumivyöryn lailla etenevän reaktion, mahdollistaen sähkövirran kulun SiPM-sirun läpi. Tämän vuoksi ulkoapäin SiPM-sirua voidaan käsitellä tavallisena diodina. [27, 28]

Fotonin osuessa valodiodiin, puolijohdemateriaali absorboi sen. Mikäli absorboitunut fotoni on riittävän energiainen, se synnyttää puolijohdehilaan elektroniaukkoparin. Riittävän korkealla bias-jännitteellä aukosta lähtenyt elektroni kiihtyy, siirtäen kulkiessaan kineettistä energiaa läheisiin molekyyleihin ja irrottaen edelleen uusia elektroneja. Nämä elektronit kiihtyvät vastaavasti bias-jännitteen vuoksi edelleen ja näin jatkavat prosessia. Tästä seuraa yhä useampien elektronien ”lumivyöry” (engl. avalanche), kun kiihtyvien

elektronien määrä kasvaa eksponentiaalisesti. Kiihtyvien elektronien määrän kasvattamiseen riittävää bias-jännitettä nimitetään ”vyöryjännitteeksi”. Tällä jännitteellä fotonit aikaansaavat SiPM-sirussa sähkövirran, joka puolestaan kyetään havaitsemaan piikkinä piirin jännitesignaalin. Mitatun signaalin vaste on verrannollinen ilmaisimelle osuneiden fotonien lukumäärään [29]. Esimerkki SiPM-sirun vasteesta oskilloskoopilla mitattuna on nähtävissä kuviossa 21.

Luvussa 2.4 esitettiin tuikemateriaalissa syntyvän noin 25000 fotonia. Tuikemateriaaliekon ja ilmaisinsirujen geometriasta johtuen yksittäinen SiPM-siru havaitsee fotoneja noin 0,2 % tästä määrästä. Kun SiPM-siru peitettiin täysin havaittiin termisen tapahtuman (engl. dark count) eli lämpöliikkeestä johtuva satunnainen tapahtuman vasteeksi noin 5 mV. SiPM-sirujen tapauksessa voidaan approksimoida tällaisen tapahtuman vastaavan yksittäisen fotonin osumaa ilmaisimelle. Tällöin saadaan yhden myonin SiPM:llä tuottaman signaalin suuruudeksi noin 200 mV.



**Kuvio 21.** Näyttökaappaus oskilloskoopilla havaitusta myonin aiheuttamasta signaalista SiPM-sirulla. Näytöllä näkyvässä signaalissa on SiPM-sirun tyypillinen vaste myonin tuikemateriaalissa tuottamille fotoneille. Signaalin nousuaika on kymmenen nanosekuntin luokkaa ja puoliintumisaika on noin 320 ns, jolloin aikavakio  $\tau \approx 460$  ns.

## 5 Havainnot

Tässä luvussa esitellään toteutetun TDC-järjestelmän suorituskykyä, sekä käydään läpi mittauksien tulokset ja työssä esiintyviä virhelähteitä.

### 5.1 TDC:n suorituskyky

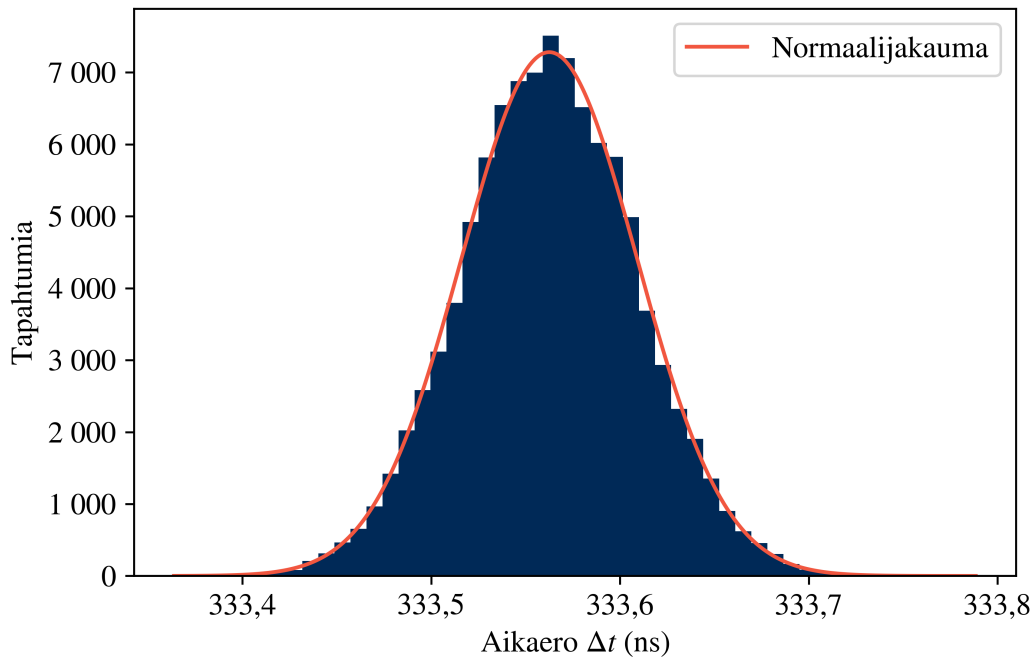
TDC:n suorituskykyä ja toimintaa tutkittiin pääasiassa signaaligeneraattorin tuottamalla signaalilla, jonka parametreja kyettiin muuttamaan. Näiden mittausten perusteella osoittautui, että järjestelmä kykeni mittaamaan eritaajuisia signaaleja alle yhden hertsin taajuuksista aina megahertsin taajuuksiin asti. Mittausten perusteella TDC-järjestelmän aikaresoluutio osoittautui olevan joidenkin kymmenien pikosekuntien luokkaa hieman mitattavista aikaeroista riippuen. Erään tyypillisen mittauksen aikaeroista muodostettu histogrammi on esitettyinä kuviossa 22. Kuvaajasta on nähtävissä miten hyvin mitatut aikaerot ovat normaalijakautuneet ja tätä havainnollistamaan on kuvaajaan sovitettu normaalijakauma, jonka keskiarvo oli 333,563 ns ja keskihajonta 0,046 ns.

Kuviossa 23, on puolestaan esitetty kaksiulotteisen histogrammin muodossa eräässä mittauksessa saatujen aikaerojen kehitystä. Kuvaajassa jokainen pystyrivi esittää tiettyä aikaväliä, jona mitatut aikaerot ovat ryhmitelty tasavälisiin luokkiin pysty akselille. Kunkin pikselin väri kuvaa kyseessä olevaan luokkaan osuneiden aikaerojen lukumäärää logaritmisella asteikolla. Kuvaajasta voidaan havaita mitattujen aikaerojen pysyttelevän melko hyvin vakiona koko mittauksen ajan. Tämä tarkoittaa jokaisen pystyrivin seurailevan kuvion 22 normaalijakautunutta muotoa.

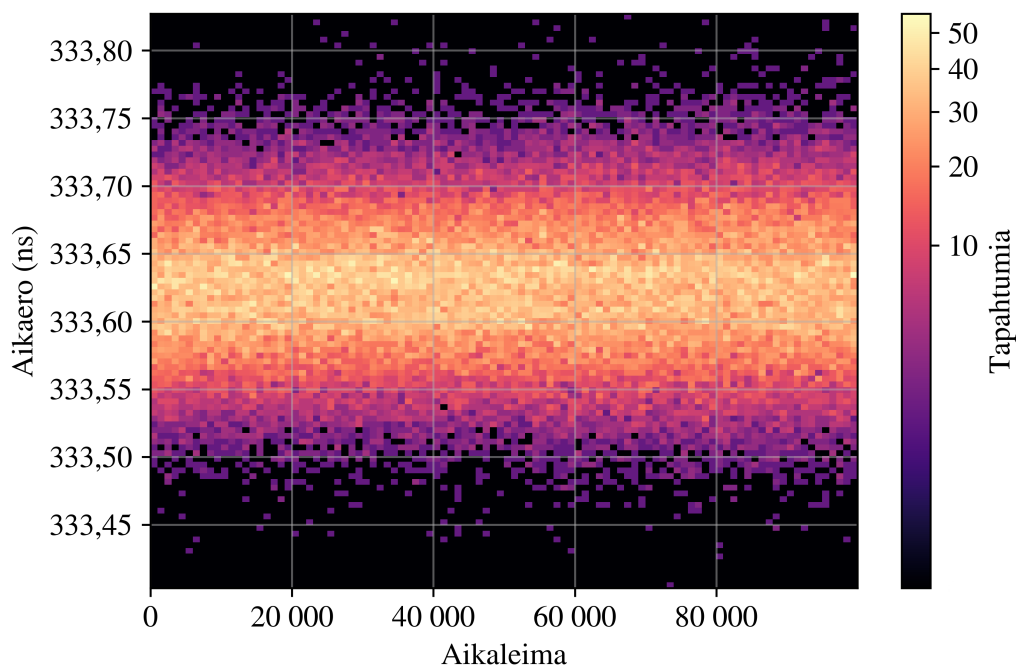
Mittauksissa saatujen tulosten ohella on tärkeä huomata myös, että TDC-järjestelmään liittyy kuollut aika (engl. dead time), jolloin TDC:n kanava ei rekisteröi uusia tapahtumia. Tämä johtuu haarautetun viivästyslinjan käytöstä hienoajan määrittämisessä, sillä järjestelmä kykenee yhden kellojakson aikana käsittelemään ainoastaan yhden signaalin. Viivästyslinjassa käytetyt D-kiikut eivät nimittäin reagoi mikäli saman kellojakson aikana tulee toinen looginen korkea pulssi, sillä niiden sisääntulossa on jo valmiina looginen korkea ja nämä kiikut luetaan vain kerran kellojaksossa. Koska TDC-järjestelmän kellotaajuus on 350 MHz tulee tästä johtuen maksimissaan noin 2,857 ns kuollut aika, jolloin TDC:n

kanava ei rekisteröi uusia tapahtumia.

Toinen TDC:n toteutukseen liittyvä kuollut aika johtuu FPGA:n BRAMista. Jokaiseen tapahtumaan liittyvät aikaleimat tallennetaan muistiin yhteen BRAMin 2042 muistiosoitteesta. Kun tämä muistiavaruus täyttyy, mittaaminen keskeytyy hetkeksi, jonka aikana vielä lähettämättömät aikaleimat lähetetään ja muisti tyhjennetään. Tämän kuolleen ajan suuruutta voidaan selvittää mittaamalla yhden kanavan tapahtumien aikaeroja, kun tapahtumat tulevat vakiotaajuudella. Kuviossa 24 on esitetty yhden tällaisen mittauksen tuloksia, joista voidaan havaita BRAMin täyttymisestä johtuvan kuolleen ajan olevan tyypillisesti alle 0,7 ms luokkaa. Tämän kuolleen ajan pienentämiseksi voitaisiin BRAMin muistinhallinta toteuttaa jonomuistina, eli FIFO (engl. first in, first out) menetelmällä, niin että yksi haara kirjoittaa jatkuvasti muistiin uusia tuloksia samalla kun toinen lukee tuloksia palvelimelle lähetettäväksi. Vaihtelut kuolleen ajan kestossa johtunevat BRAMia lukeneen käyttöjärjestelmän matalammasta kelloaajuudesta, sekä muista prosessoria kuormittavista prosesseista.



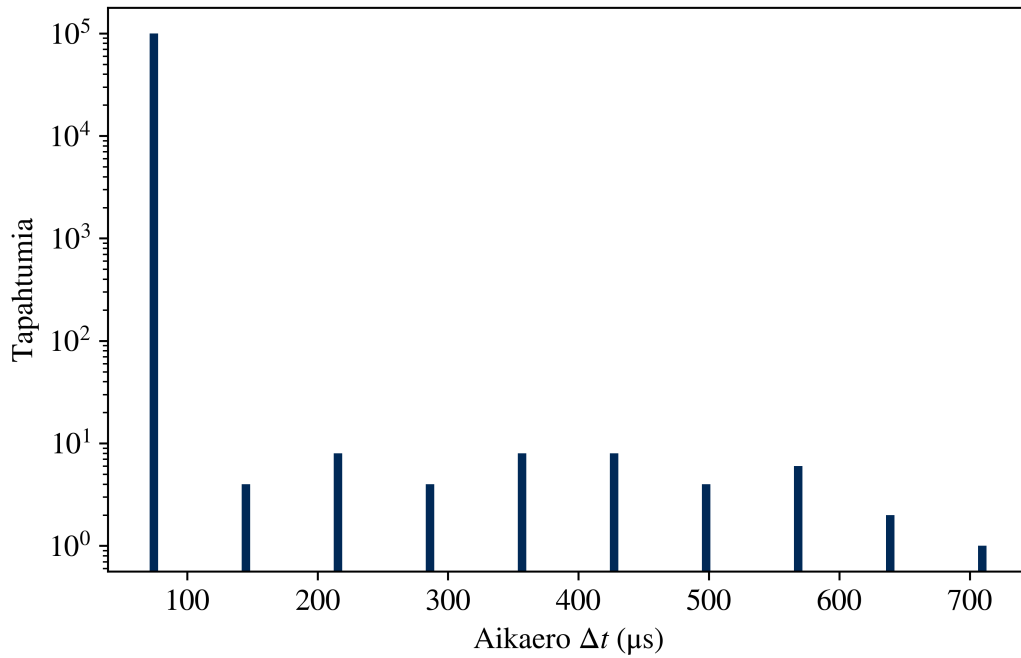
**Kuvio 22.** TDC-järjestelmällä signaaligeneraattorin tuottamasta signaalista mitatuista aikaeroista muodostettu histogrammi. Kuvaajaan on lisäksi piirretty mittausdataan sovitettu normaalijakauma. Mittauksessa tallennettiin molemmista kanavista 100000 näytettä, joiden välinen aikaero laskettiin. Mittauksen keskiarvo oli 333,563 ns ja keskihajonta 0,046 ns.



**Kuvio 23.** TDC-järjestelmällä mitattujen aikaerojen kehitys mittauksen aikana kaksiulotteisella histogrammilla kuvattuna. Kuvaajassa jokainen pystyrivi esittää tiettyä aikaväliä, jona mitatut aikaerot ovat ryhmitelty tasavälisiin luokkiin. Kunkin pikselin väri kuvaa kyseessä olevaan luokkaan osuneiden aikaerojen lukumäärää logaritmisella asteikolla. Mittauksessa tallennettiin molemmista kanavista 100000 näytettä, joiden välinen aikaero laskettiin. Mittauksen keskiarvo oli 333,563 ns ja keskihajonta 0,046 ns. Kuvion 26 kuvaaja on piirretty samasta mittausaineistosta.

Lisäksi rakennetussa mittausasetelmassa mitattiin TDC:n aikaeron ja keskihajonnan välistä suhdetta. Kuviossa 25 on piirrettynä mittaustulokset. Kuvaajasta nähdään, että pitkilläkin aikaeroilla TDC:n tarkkuus aikaerojen määrittämisessä on epätarkimmillaan luokkaa  $\pm 58$  ps. Lisäksi kuvaajan tarkennetusta kohdasta voidaan havaita keskihajonnan kasvavan lähes lineaarisesti noin 400 nanosekuntiin asti. Näihin mittauksiin tulee kuitenkin suhtautua terveellä skeptisyydellä, sillä yli 400 ns viiveet toteutettiin digitaalisella signaaligeneraattorilla luomalla sen eri kanaviin siniaaltoja, joiden välille asetettiin vaihe-eroa. Näissä tapauksissa on mahdollista, että signaaligeneraattorin ominaisuudet, kuten kellon epävakaumus, ovat voineet vaikuttaa mitattuihin tuloksiin.

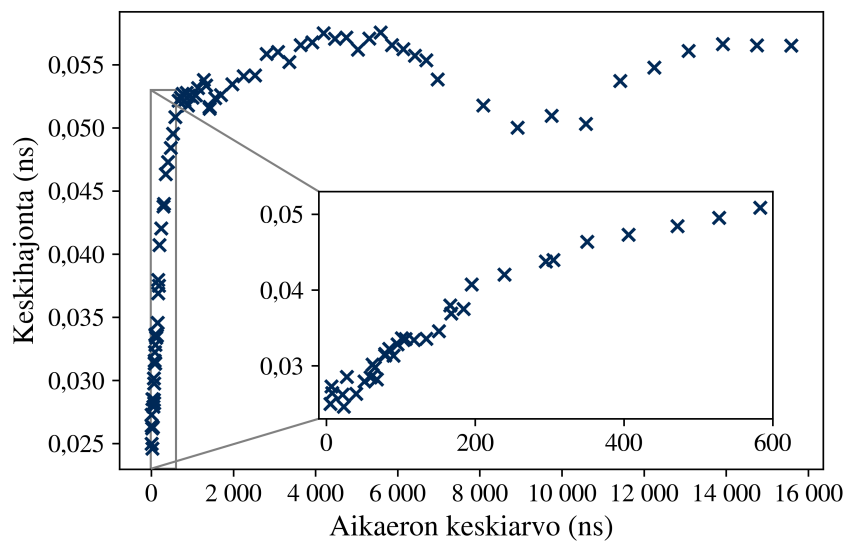
Red Pitayan referenssikellon vakautta ja heiluntaa tutkittiin pitkien, kymmeniä tunteja kestävien mittauksien avulla. Mittauksissa TDC:lle annettiin koko mittauksen ajan samanlaista signaalia signaaligeneraattorista, minkä jälkeen mitattujen aikaerojen keskiarvoa tarkastelemalla voitiin arvioida referenssikellon vakautta. Erään tällaisen mittauksen



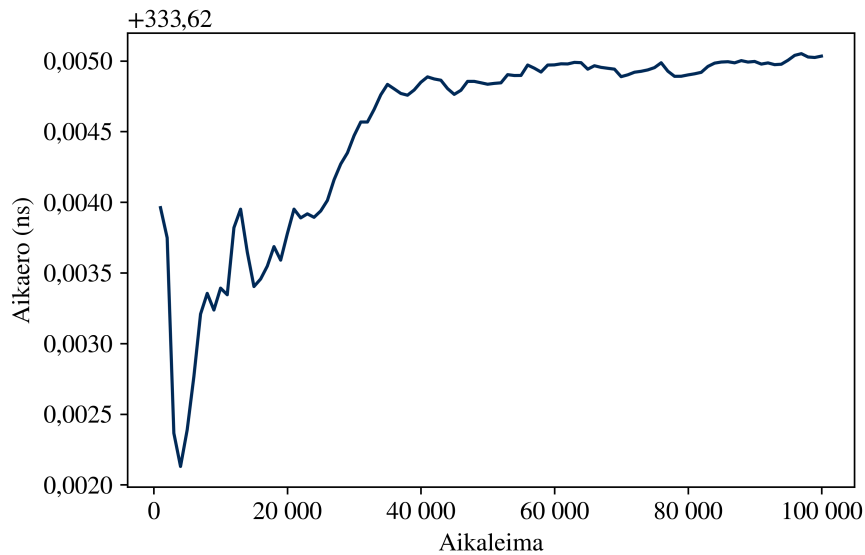
**Kuvio 24.** TDC-järjestelmällä yhdestä kanavasta mitattuja aikaeroja. Mitattu signaali tuotettiin signaaligeneraattorilla. Histogrammin pääpiikki muodostuu tutkittavan signaalin taajuuden osoittamaan kohtaan  $\Delta t = 1/f$  ja muut piikit osuvat jaksonajan monikertoihin. Yksittäiset tapahtumat kuvaavat BRAMin täyttymisestä ja tyhjentämisestä johtuvaa kuollutta aikaa. Pisimmillään tästä johtuva kuollut aika voi olla millisekuntien luokkaa. Tässä mittauksessa aikaeroja mitattiin 100117 kappaletta.

keskiarvon kehitys on piirretty kuviossa 26. Kuvaajan alussa näkyvät vaihtelut johtuvat osittain satunnaisuudesta ja osittain laskentakortin lämpenemisestä. Kuten kuvaajasta voidaan havaita, ei Red Pitayan sisäisessä kellossa esiinny merkittävää aikajaksovirhettä. Esimerkiksi 18 tunnin mittauksessa mitattu aikaero muuttui  $< 60$  ps ja tätä lyhyemmissä mittauksissa tyypillisesti vieläkin vähemmän. Mittauksissa ei tutkittu lämpötilan vaikutusta referenssikelloon, ja on mahdollista, että lämpötilan vaihtelu voi aiheuttaa suurempia muutoksia kellon käytöksessä. Esimerkiksi lähteessä [30] on raportti Red Pitayan sisäisen kellon vaihekohinaa ja vakautta koskevasta tutkimuksesta.





**Kuvio 25.** TDC-järjestelmän keskihajonta mitatun aikaeron funktiona. Kuvaajasta on nähtävissä mittaustarkkuuden kehittyminen aikaeron pidentyessä. Mitä suurempi aikaero on, sitä epätarkempi mittaustulos on. Kuvaajaan on lisäksi piirretty tarkennus pienen aikaerojen kohdalta.



**Kuvio 26.** TDC-järjestelmällä mitattujen aikaerojen keskiarvon kehitys. Mittauksessa tallennettiin molemmista kanavista 100000 näytettä, joiden välinen aikaero laskettiin. Mittauksen keskiarvo oli 333,563 ns ja keskihajonta 0,046 ns. Kuvion 23 kuvaaja on piirretty samasta mittausaineistosta.

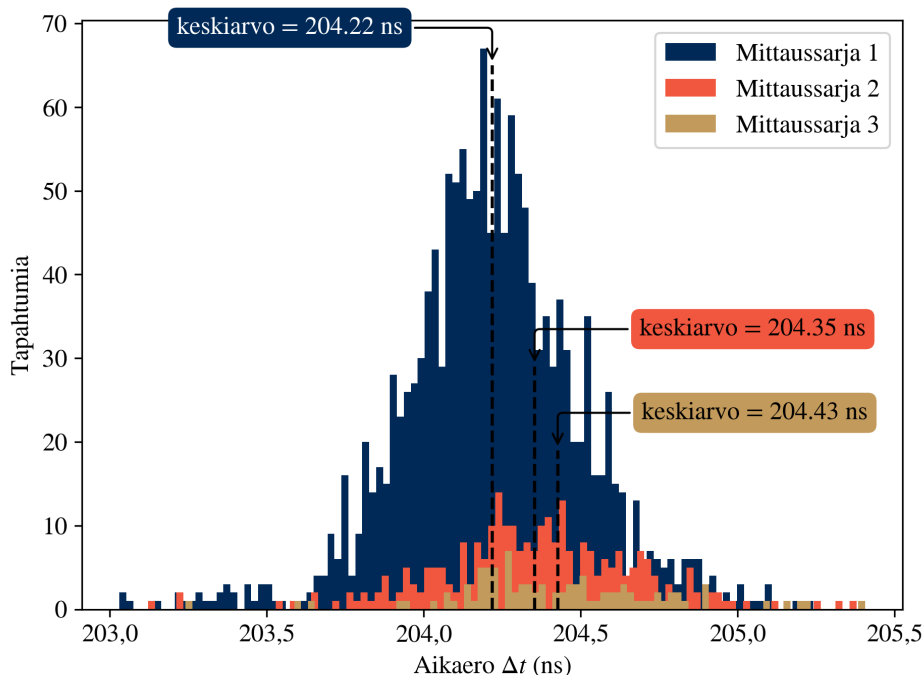
## 5.2 Gammailmaisimen mittaukset

Gammailmaisimien mittauksissa ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ) -tuokeilmaisimet asetettiin koboltti-60 gamma-lähteen vastakkaisille puolille. Ensimmäisessä mittauksessa ilmaisimet olivat umpilähteen kuoressa kiinni. Toisessa mittauksessa TDC:n 2. kanavaan kytketty ilmaisimien siirrettiin viisi senttimetriä kauemmas lähteestä ja kolmannessa mittauksessa edelleen toiset viisi senttimetriä kauemmaksi. Jokaisessa mittauksessa tallennettiin 100000 tapahtumaa kumpaankin TDC:n kanavaan. Näistä mittauksista saadut tulokset ovat piirrettyinä kuviossa 27.

Mittaustulosten arvioimiseksi niiden avulla laskettiin gammafotonien nopeus. Mittauksista saadut tulokset ovat taulukossa 2. Tuloksista voidaan nähdä, että saadut tulokset ovat merkittävästi valonnopeutta suurempia, mikä johtuu osittain verrattain pienestä mitattujen tapahtumien lukumäärästä sekä epätarkasta mittaussasetelmasta. Etenkin kolmannessa mittauksessa tapahtumia on liian vähän, alle sata kappaletta, luotettavan tuloksen saamiseksi. Ilmaisimien välisen etäisyyden kasvaessa tulee haasteeksi mitattavien tapahtumien määrä. Tämä johtuu siitä, että ilmaisimilla havaittavien yhtäaikaisten tapahtumien määrä on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. Tätä voitaisiin tulevissa mittauksissa pyrkiä kompensoimaan vielä pidemmällä mittaussajalla. Mittauksessa ilmaisimet aseteltiin pöydällä vapaasti umpilähteen molemmille puolille, joten rakentamalla tukikehikko ilmaisimille ja lähteelle voisi merkittävästi parantaa saatuja tuloksia. Verrattain suuri virhe selittyy myös etäisyysmittauksen suhteellisen suurella epätarkkuudella (0,01 m) verrattuna mitattuun matkaan. Etäisyysmittauksen virhe muodostuu pääasiassa mittanauhan mittavirheestä, sekä mittaustapahtuman epätarkkuudesta.

**Taulukko 2.** Gammailmaisimien mittauksien tuloksista lasketut valonnopeudet.

Mittaus	Etäisyys (mm)	Aikaero (ps)	Laskettu valonnopeus (m/s)
1	0	-	-
2	50	135	$(3,7 \pm 1,3) \times 10^8$
3	100	209	$(4,8 \pm 1,1) \times 10^8$



**Kuvio 27.**  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ -tuikeilmaisimilla suoritettujen gammamittausten aikaerot. Ensimmäisessä mitaussarjassa molemmat ilmaisimet olivat kiinni  $\text{Co-60}$  umpilähteessä. Toisessa mittauksessa toista ilmaisinta siirrettiin viiden senttimetrin päähän umpilähteestä ja kolmannessa kymmenen senttimetrin päähän. Jokaisessa mittauksessa tallennettiin 100000 tapahtumaa, joiden pohjalta laskettiin tapahtumien väliset aikaerot.

### 5.3 Myoni-ilmaisimen mittaukset

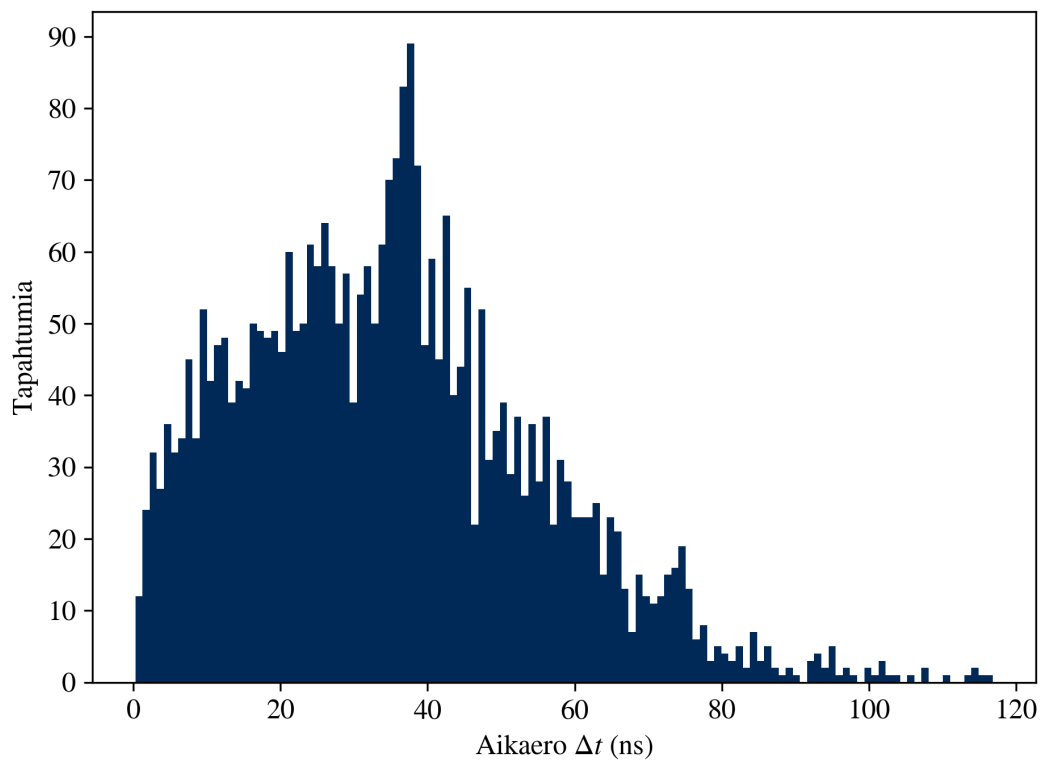
Myoni-ilmaisimella tehtiin mittauksia kahdella eri mittausasetelmalla, joissa ilmaisimen tuikemateriaalilevyt asetettiin 67 cm ja 32 cm etäisyyksille toisistaan. Korkeammalla olleelta ilmaisimelta otettiin toiselta SiPM-sirulta aloitussignaali TDC:lle ja vastaavasti alemmalta ilmaisimelta saatiin lopetussignaali. Mittauksen annettiin jatkua noin 20 tuntia, minkä jälkeen laskettiin myonien lentoajat ilmaisimien välillä. Mittauksissa saatuja tuloksia on esitettyä kuvioissa 28a ja 28b.

Myoni-ilmaisimella tehtyjen mittauksien ongelmaksi muodostui CFD:n säätäminen. Erityisesti CFD:n kävelyn (engl. walk) säätäminen osoittautui erittäin haastavaksi, mikä aiheutti eroa eri kanaviin tulevien signaalien liipaisukohtien välillä. Onnistunut walk-säätö vaatii tavallisesti hyvän referenssisignaalin ilmaisimelta. Koska myonien saapuminen tuikemateriaalille on satunnaista, oli säännöllisen signaalivasteen saaminen käytännössä mahdotonta. Lisäksi myonien tuikemateriaalikielikon läpäisykohta ja -kulma ovat satun-

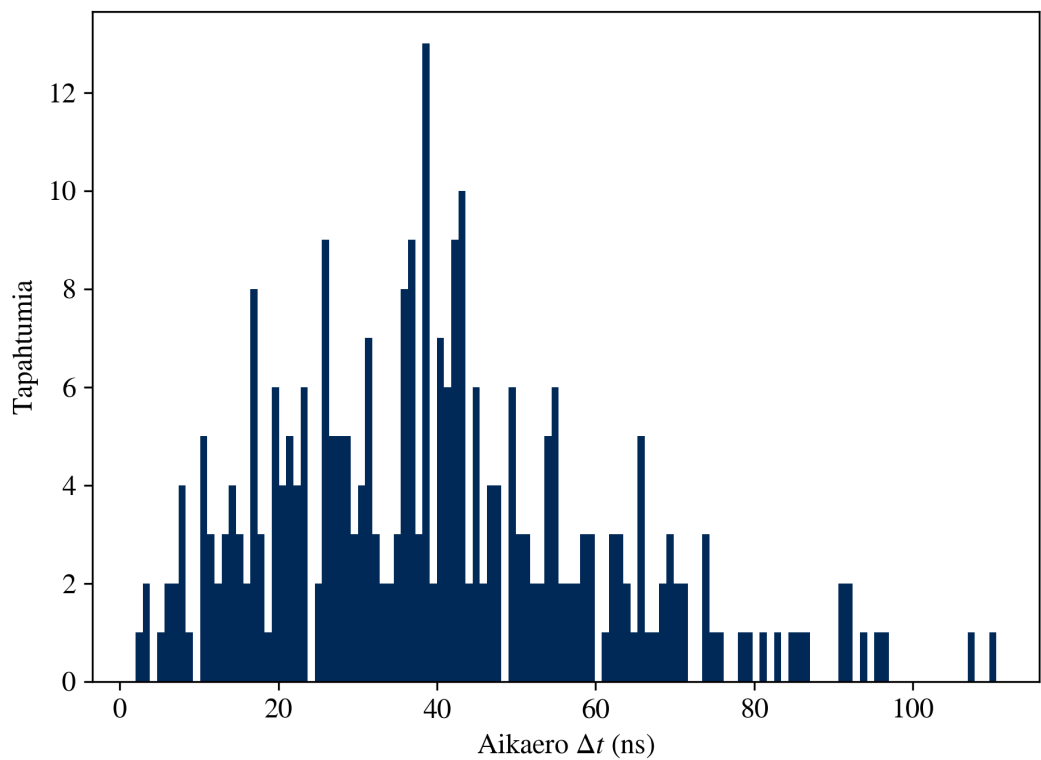
naisia, jolloin myös muodostuvien fotonien lukumäärä ja syntykohta tuikemateriaalissa ovat satunnaisia. Tämä puolestaan johtaa siihen, että myös SiPM-sirujen vaste myoneille vaihtelee merkittävästi. Tätä vaikeuttaa ennestään se, että suurin osa muodostuvista fotoneista karkaa tuikemateriaaliekikosta reunojen kautta, jolloin SiPM-sirujen havaitsemien fotonien määrä jää verrattain pieneksi ja riippuu voimakkaasti fotonien syntykohdan ja SiPM-sirujen välisestä etäisyydestä. Paremmalla valonohjauksella voitaisiin saavuttaa SiPM-sirujen vakaampi ja ennakoitavampi vaste myonin läpäisyn tuottamille fotoneille, mikä puolestaan voi helpottaa CFD:n säätöä.

Koska CFD:tä ei onnistuttu nykyisillä resursseilla säätämään myoni-ilmaisimelle sopivaksi, käytettiin mittauksissa  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  -tuikeilmaisimille tarkoitettuja asetuksia. Tämä johti kuviossa 28 nähtävään epäsymmetriseen käyrään, jossa CFD:n kävelyn (engl. walk) vuoksi signaalin liipaisukohta eroaa signaalien välillä. Virheellisesti säädetty walk aiheuttaa virhettä CFD-piirin ajoituksessa, sillä tällöin eri amplitudien pulssit ylittävät niin kutsutun nollatason eri aikaan. Tarkempaa tietoa walk asetuksesta ja sen säädöstä löytyy CFD:n valmistajan käyttöohjeesta [31].

Käytännössä virheellisesti säädetty walk näkyy kuvioiden 28 muodossa. Verrattuna kuvion 22 normaalijakaumaan, mitattujen aikaerojen epäsymmetria johtuu CFD:n liian aikaisesta tai myöhäisestä liipaisusta SiPM:n antamaan signaaliin. Kun myonimittauksissa käytettyyn signaalinkäsittelypiiriin luotiin signaaligeneraattorilla signaalia, saatiin eri haarojen viiveeksi noin 40 ns. Molemmista kuvioista 28a ja 28b on havaittavissa tällä kohtaa piikki tuloksissa, mikä viittaa siihen, että sopivan kokoisilla signaaleilla CFD-piiri on onnistunut liipaisemaan oikeasta kohdasta. Tämä viittaa siihen, että kasvattamalla SiPM-piireille tulevan valon määrää esimerkiksi valonohjaimilla, voitaisiin saada yhdenmukaisempia tuloksia eri energiaisista ja eri tavalla ilmaisimeen osuvista myoneista. Tällöin myös CFD:n säätäminen ilmaisimelle sopivaksi olisi helpompaa.



(a) Ilmaisimien etäisyys 32 cm



(b) Ilmaisimien etäisyys 67 cm

**Kuvio 28.** TDC:llä mitattuja myonien lentoaikoja eri etäisyyksillä

## 6 Johtopäätökset

Tässä luvussa arvioidaan suoritettua tutkimusta ja sen tuloksia. Erityisesti keskitytään tutkimuskysymyksiin:

1. Rakennetun TDC-järjestelmän suorituskyky
2. Rakennetun TDC-järjestelmän soveltuvuus myoni-ilmaisimen signaalinkäsittelyssä.

Lisäksi pohditaan mittauksien vaikutusta tuleviin suunnitelmiin myoni-ilmaisimen rakentamisessa, sekä muita sovelluskohteita TDC:lle.

Rakennetun TDC-järjestelmän suorituskyky osoittautui positiiviseksi yllätykseksi. Alustavasti suurimmat epäilykset kohdistuivat aikaresoluutioon, sekä referenssikellon vakauteen. Alkuperäisen toteutuksen suorituskykymittauksissa Adamič saavutti alle 20 ps aikaresoluution, mutta nämä kokeet suoritettiin ainoastaan signaaligeneraattorin avulla ja matalilla taajuuksilla. Tämän lisäksi laitteistoa ei ollut aikaisemmin tutkittu pitkän aikavälin mittauksissa. TDC:hen tehtyjen muutosten vaikutukset tuli myös selvittää.

Signaaligeneraattorin avulla suoritettut mittaukset vahvistivat nopeasti laitteiston hyvän suorituskyvyn. TDC:llä mitattiin useiden eri taajuusalueiden signaaleja muutamista hertseistä satoihin megahertzeihin asti. Lisäksi eri kanavien signaalien aikaeroja vaihdeltiin muutamista nanosekunneista kymmeneen mikrosekunteihin. Myös mittauksien kestoa vaihdeltiin muutamista sekunneista kahdenkymmenen tunnin mittauksiin asti.

TDC-järjestelmän aikaresoluution havaittiin olevan riippuvainen mitatun aikaeron pituudesta. Parhaimmillaan pienillä aikaeroilla järjestelmä saavutti noin 25 ps tarkkuuden, mutta tyypillisemmissäkin satojen nanosekuntien aikaerotapauksissa aikaresoluutioksi saatiin tyypillisesti  $< 45$  ps. Mittauksien tuloksia on esitetty kuviossa 25.

Laskentakortin referenssikellon vakautta tarkasteltiin pitkäkestoisilla mittauksilla. Kymmenienkään tuntien mittauksien tuloksissa ei kuitenkaan ollut havaittavissa merkittävää kellon aikajaksovirhettä. Esimerkiksi 18 tunnin mittauksessa mitattu aikaeron keskiarvo muuttui  $< 60$  ps ja tätä lyhyemmissä mittauksissa tyypillisesti vieläkin vähemmän.

Kaiken kaikkiaan luotu TDC-järjestelmä täytti sille asetetut odotukset ja osoittautui, etenkin signaaligeneraattorilla suoritetuissa kokeissa, hyvin nopeisiin mittauksiin toimivaksi työkaluksi. Ennen mittauksia suurimmat kysymysmerkit kohdistuivat erityisesti laitteiston

referenssikellon vakauteen, aikaresoluutioon ja kykyyn mitata pitkän aikavälin mittauksia. Red Pitaya -kortin kello osoittautui mittauksissa riittävän vakaaksi, jotta järjestelmää voidaan käyttää pidemmissäkin mittauksissa. Aikaerojen mittauksissa aikaresoluutio on riittävä useimpiin sovelluskohteisiin ja myös pitkien aikaerojen mittaaminen onnistui hyvin ja laitteiston tarkkuus pysyi näissäkin tapauksissa erinomaisena.

Jatkokehitystä tarvitaan kuitenkin vielä ennen kuin järjestelmää voidaan viedä aktiivisempaan mittauskäyttöön. Tärkeimpänä tulevaisuuden kehityskohteenä on jonomuistin, FIFO:n toteuttaminen. Tällä voidaan tehostaa Red Pitayan muistin käyttöä ja vähentää järjestelmän kuollutta aikaa. Nykyisessä versiossa muistin täyttyessä mittaus pysäytetään muistin lukemisen ajaksi, mutta FIFO-rakenteella muistia voitaisiin lukea mittauksen aikana. Tällöin mittauksessa menetetään dataa ainoastaan, mikäli muistin kiertävät kirjoitusosoitteet saavuttaisivat lukuosoitteet.

Toinen jatkotutkimisen arvoinen asia on TDC:n arkkitehtuuri. Nyt käytetty TDL toteutus toimii hyvin, mutta on olemassa myös muita alle kellojakson tarkkuuden mahdollistavia arkkitehtuureita, kuten pulssin vaimennus (engl. pulse shrinking) [32] tai Vernier menetelmä (engl. Vernier method) [8]. Myös TDL:n haarojen tarkempi toteutus FPGA:lla voi mahdollistaa paremman aikaresoluution, sillä tällä hetkellä suuri vaihtelu haarojen pituuksien välillä aiheuttaa merkittävää epävarmuutta. Toisaalta voidaan tutkia myös TDC:n referenssikellotaajuuden kasvattamista. Tällöin TDL:n haaroja tarvitaan vähemmän, jolloin FPGA:lle jää enemmän tilaa haarojen paremmalle ja yhdenmukaisemmalle toteutukselle. Samalla yksittäisten haarojen merkitys lopputulokseen kasvaa.

Muita jatkotutkimuksen arvoisia asioita TDC-järjestelmän osalta ovat muun muassa Red Pitayan käyttöjärjestelmän vaikutus muistin lukemiseen, sekä muiden Red Pitaya mallien tehokkaampien FPGA piirien vaikutus järjestelmän suorituskykyyn. Useampien kanavien lisääminen TDC-järjestelmään toisi laitteistolle myös enemmän sovelluskohteita. Lisäksi datankeruun puolella ohjelmistoa tulisi myös kehittää käyttäjäystävällisemmäksi ja säikeistää nopeamman laskennan mahdollistamiseksi.

Vaikka jatkokehittelyä tarvitaankin, on TDC-järjestelmä herättänyt jo kiinnostusta Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen eri tutkimusryhmien keskuudessa. Edullinen, muokattava ja riittävän nopea TDC mahdollistaa nykyistä helpomman ja kustannustehokkaamman laitteiston tutkimuksen ja kehittämisen.

Myönteillisimmin osalta mittaukset jäivät hieman vajavaisiksi CFD:n säätöjen vuoksi. Ilmaisimessa on kuitenkin myös muita puutteita, joiden korjaamisella myös CFD:n säätämisestä tulisi helpompaa. Merkittävin puute nykyisessä mittauslaitteistossa on SiPM-

ilmaisimelle saatavien fotonien määrä. Tätä voitaisiin tehostaa erilaisilla valo-ohjaimilla, joiden suunnittelutyö on jo aloitettukin. Lisäksi ilmaisimateriaalikielkkoon voitaisiin asettaa useampia SiPM-siruja havaitsemaan valoa, jolloin voitaisiin selvittää myös myonin tuikemateriaalin läpäisykohta. Ilmaisimen tekninen toteutus vaatii siis vielä tutkimus- ja suunnittelutyötä etenkin valonkeräämisen tehostamisen osalta.

Red Pitaya -kortin käyttäminen tulevassa MOTTI-ilmaisimessa vaikuttaa siis hyvin todennäköiseltä tulevaisuudensuunnitelmalta. FPGA:n lisäksi Red Pitayassa on A/D-muunnin, joka voisi mahdollistaa SiPM-siruilta tulevien jännitetasojen tallentamisen. Yhtäaikainen TDC:n ja ADC:n käyttö onkin yksi tulevaisuuden tutkimuskohde, joka toimiessaan puoltaa vahvasti Red Pitayan käyttöä MOTTI-ilmaisimessa.



## Lähteet

- [1] E. Kuusisto. ”Myonisuihkujen havaintoaseman ilmaisimen testaus”. LuK-tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2022.
- [2] C. Grupen. *Astroparticle Physics*. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 9783030273392.
- [3] G. Bonomi ym. ”Applications of cosmic-ray muons”. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 112 (2020), s. 103768. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2020.103768.
- [4] Defense Advanced Research Projects Agency. *Muons for Science and Security*. 2022. URL: <https://www.darpa.mil/program/muons-for-science-and-security> (viitattu 08.02.2023).
- [5] C. S. Levin ym. ”Design Features and Mutual Compatibility Studies of the Time-of-Flight PET Capable GE SIGNA PET/MR System”. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 35 (2016), s. 1907.
- [6] C. Ugur ym. ”A 16 channel high resolution ( $< 11$  ps RMS) Time-to-Digital Converter in a Field Programmable Gate Array”. *Journal of Instrumentation* 7 (2012), s. C02004.
- [7] M. Laitinen ym. ”Time-of-flight – Energy spectrometer for elemental depth profiling – Jyväskylä design”. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms* 337 (2014), s. 55.
- [8] J. Kalisz. ”Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution”. *Metrologia* 41 (2003), s. 17. DOI: 10.1088/0026-1394/41/1/004. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/004>.
- [9] P. Zyla ym. ”Cosmic Rays”. Teoksessa: *Particle Data Group: Reviews, Tables & Plots*. 2019. URL: [https://pdg.lbl.gov/2021/reviews/contents\\_sports.html](https://pdg.lbl.gov/2021/reviews/contents_sports.html) (viitattu 29.10.2021).
- [10] L. N. Bogdanova ym. ”Cosmic Muon Flux at Shallow Depths Underground”. *Physics of Atomic Nuclei* 69 (2006), s. 1293. DOI: 10.1134/S1063778806080047.

- [11] P. Zyla ym. "Leptons". Teoksessa: *Particle Data Group: Review of Particle Physics*. 2021. URL: <https://pdg.lbl.gov/2021/tables/rpp2021-sum-leptons.pdf> (viitattu 17.03.2022).
- [12] P. Shukla ja S. Sankrith. "Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth". *International Journal of Modern Physics. A, Particles and Fields, Gravitation, Cosmology* 33 (2018), s. 1850175. DOI: 10.1142/S0217751X18501750.
- [13] E. Le Boulicaut. "Cosmic Ray Muon Detection". Master's Thesis. Gustavus Adolphus College, 2018. URL: [https://gustavus.edu/academics/departments/physics/concertFiles/media/Cosmic\\_Ray\\_Muon\\_Detection\\_Thesis.pdf](https://gustavus.edu/academics/departments/physics/concertFiles/media/Cosmic_Ray_Muon_Detection_Thesis.pdf).
- [14] P. Zyla ym. "Passage of Particles Through Matter". Teoksessa: *Particle Data Group: Reviews, Tables & Plots*. 2020. URL: <https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-passage-particles-matter.pdf> (viitattu 29.10.2021).
- [15] C. W. Fabjan ja H. Schopper. *Particle physics reference library. Volume 2, Detectors for particles and radiation*. Cham: Springer Open, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-35318-6.
- [16] R. M. Sternheimer. "Density effect for the ionization loss of charged particles in various substances". *Atomic data and nuclear data tables* 30 (1984), s. 261. DOI: 10.1016/0092-640X(84)90002-0.
- [17] *EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212 Data Sheet*. Eljen Technology. 2023.
- [18] R. D. Knight. *Physics for Scientists and Engineers: A Strategic Approach with Modern Physics, Global Edition - 4th Edition*. Boston, MA, USA: Pearson Education Inc., 2017, s. 988. ISBN: 1-292-15742-9.
- [19] M. Adamič ja A. Trost. "A Fast High-Resolution Time-to-Digital Converter Implemented in a Zynq 7010 SoC". Teoksessa: *Austrochip Workshop on Microelectronics*. 2019, s. 29. DOI: 10.1109/Austrochip.2019.00017.
- [20] E. Monmasson ja M. N. Cirstea. "FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems—A Review". *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54 (2007), s. 1824. DOI: 10.1109/TIE.2007.898281.
- [21] M. N. Isa ym. "Field Programmable Gate Array (FPGA): From Conventional to Modern Architectures". Teoksessa: *Digital and Analogue Electronics Circuits and Systems*. 2015, s. 53. ISBN: 978-967-5415-98-2.

- [22] R. Giordano ym. "High-Resolution Synthesizable Digitally-Controlled Delay Lines". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 62 (2015), s. 3163. DOI: 10.1109/TNS.2015.2497539.
- [23] P. Mangalagiri ym. "Thermal-aware reliability analysis for Platform FPGAs". Teoksessa: *2008 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*. 2008, s. 722. DOI: 10.1145/1509456.1509613.
- [24] Y. Wang ym. "A 3.9-ps RMS Precision Time-to-Digital Converter Using Ones-Counter Encoding Scheme in a Kintex-7 FPGA". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 64 (2017), s. 2713. DOI: 10.1109/TNS.2017.2746626.
- [25] K. Shah ym. "LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillators for gamma-ray spectroscopy". *IEEE Transactions on Nuclear Science* 50 (2003), s. 2410. DOI: 10.1109/TNS.2003.820614.
- [26] K. Kossert ym. "Activity determination of <sup>60</sup>Co and the importance of its beta spectrum". *Applied Radiation and Isotopes* 134 (2017). DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.06.015.
- [27] T. Szcześniak ym. "Time resolution of scintillation detectors based on SiPM in comparison to photomultipliers". Teoksessa: *IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference*. 2010, s. 1728. DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5874070.
- [28] F. Acerbi ja S. Gundacker. "Understanding and Simulating SiPMs". *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 926 (2019), s. 16. DOI: 10.1016/j.nima.2018.11.118.
- [29] J. Heller. "Silicon Photomultipliers: Characterization and Cosmic Ray Detection". LuK-tutkielma. Brandeis University, Department of Physics, 2020. URL: [http://www.bndhep.net/Electronics/A2088/SiPM\\_Characterization.pdf](http://www.bndhep.net/Electronics/A2088/SiPM_Characterization.pdf).
- [30] A. C. Cárdenas Olaya ym. "Phase Noise and Frequency Stability of the Red-Pitaya Internal PLL". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 66 (2019), s. 412. DOI: 10.1109/TUFFC.2018.2883830.
- [31] *Model 935 Quad Constant-Fraction 200-MHz Discriminator Operating and Service Manual*. ORTEC Part No. 753770. Rev. H. ORTEC. 2003.
- [32] L. Xiang ym. "Ultra compact pulse shrinking TDC on FPGA". *Measurement* 203 (2022), s. 111874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111874>.